

Regulatorischer Anpassungsbedarf bei Plug-in-Hybridfahrzeugen in Eu- ropa

Karlsruhe, Berlin,
18. Februar 2026

Bericht zum Vorhaben Wissenschaftliche Unterstützung Klimapoli-
tik und Maßnahmenprogramm (14-BE-2203)

Kontaktpersonen:

P. Plötz & T. Gnann (Fraunhofer ISI), P. Kasten (Öko-Institut)

Zitierempfehlung:

Plötz, P., Gnann, T. Kasten, P., Steinbach, I., Jöhrens, J. (2026):
*Regulatorischer Anpassungsbedarf bei Plug-in-Hybridfahrzeugen
in Europa*. Bericht zum Vorhaben Wissenschaftliche Unterstützung
Klimapolitik und Maßnahmenprogramm (14-BE-2203); Karlsruhe,
Berlin, Heidelberg, 2025

Öko-Institut
Borkumstraße 2
13189 Berlin

Prognos AG Berlin
Goethestraße 85
10623 Berlin

IREES GmbH
Durlacher Allee 77
76131 Karlsruhe

Gesellschaft für Wirtschaftliche Strukturforschung mbH
Heinrichstr. 30
49080 Osnabrück

**Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg
gGmbH**
Wilckensstraße 3
69120 Heidelberg

**Fraunhofer Institut für System- und Innovationsforschung
ISI**
Breslauer Str. 48
76139 Karlsruhe

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung	5
1. Einleitung	11
1.1. Motivation, Zielsetzung und Hintergrund	11
1.2. Hintergrund PHEV	12
1.2.1. Übersicht und Betriebsmodi	12
1.2.2. Definition Charge-Depleting-Mode	14
1.2.3. Utility Faktoren	16
1.2.4. Bestehende und geplante Änderungen der Utility-Faktoren	17
2. Daten und Methodik	19
2.1. Empirische Grundlage: OBFCM-Daten	19
2.2. Methodik	20
3. Ergebnisse	23
3.1. Empirische Analysen der OBFCM-Realemissionsdaten	23
3.1.1. Deskriptive Statistik	23
3.1.2. Zusammenhänge	27
3.2. Empirische Utility-Faktor-Kurven	31
3.2.1. Einleitung und Definitionen	31
3.2.2. Zusammenhänge zwischen den UF	31
3.2.3. Ergebnisse für UF-Kurven	34
3.2.4. Diskussion und Sensitivität	39
3.2.5. Fazit	42
3.3. Bewertung VDA-Forderungen auf Einzelfahrzeugebene	43
3.3.1. Forderungen des VDA	43
3.3.2. Aussetzen der Anpassungen	43
3.3.3. Maßnahmen zur Erhöhung des Utility Factors	45
3.4. Szenario-Modellierung der CO ₂ -Emissionswirkungen	52
3.4.1. Szenarioausgestaltung	52
3.4.2. Ergebnisse	53
3.5. Regulatorische Anforderungen für Low-Emission-PHEV	56
3.5.1. Ausgangslage und Problemstellung	56
3.5.2. Range-Extender und Internationale Beispiele für Regulierung	57
3.5.3. Elemente eines möglichen Regulierungsrahmens	58
Literaturverzeichnis	60

Anhang 63

Zusammenfassung

Hintergrund und Zielsetzung

Plug-in-Hybrid-Fahrzeuge (PHEV) können sowohl verbrennungsmotorisch als auch batterieelektrisch gefahren und über das Stromnetz geladen werden. Einen Klimanutzen gegenüber herkömmlichen Verbrennern entfalten die Fahrzeuge nur im batterieelektrischen Betrieb. PHEV tragen deutlich zur Erfüllung der CO₂-Flottengrenzwerte in Europa für Europäische Pkw-Hersteller bei, allerdings sind ihre realen CO₂-Emissionen drei- bis fünf-mal höher als die Typgenehmigungswerte, wie aktuelle Auswertungen der Realverbrauchserfassung (On-Board Fuel Consumption Monitoring (OBFCM)-Daten) von ca. einer Million PHEV in Europa zeigen (Plötz & Gnann 2025, EEA 2025).

Die vorliegende Studie analysiert die regulatorischen Implikationen dieser Abweichungen. Insbesondere werden realitätsnahe Werte für den sogenannten Utility Factor (UF) abgeleitet, der die bei der Typgenehmigung erhobenen Normverbräuche zu einem kombinierten Verbrauchswert zusammenführt. Des Weiteren werden aktuelle Forderungen des VDA zum regulatorischen Umgang mit PHEV bewertet und mittels einer Szenarioanalyse aufgezeigt, welche klimapolitischen Konsequenzen sich aus der Umsetzung dieser Forderungen ergäben. Ziel ist es, eine evidenzbasierte Grundlage für politische Entscheidungen zur Weiterentwicklung der PHEV-Regulierung zu schaffen.

Daten und Methodik

Die Analyse basiert auf OBFCM-Daten der European Environment Agency (EEA) von etwa einer Million PHEV, die zwischen 2021 und 2023 in Europa zugelassen wurden. Die Daten umfassen die gesamte Fahrzeuglebensdauer und beinhalten Gesamtfahrleistung, Kraftstoffverbrauch, den Anteil der Kilometer im Charge Depleting-Mode (CD-Mode), im CD-Mode mit Verbrennungsmotor aus, im Charge Sustaining-Mode (CS-Mode) sowie technische Fahrzeugdaten wie elektrische Reichweite und offizielle CO₂-Werte, aufgeschlüsselt nach Hersteller, Modell, Baujahr und Kraftstoffart.

Methodisch wurden Regressionsanalysen durchgeführt, um realistische Utility-Factor-Kurven basierend auf dem tatsächlichen elektrischen Fahranteil in Abhängigkeit von der elektrischen Reichweite zu bestimmen. Die aktuellen und regulatorisch geplanten UF-Kurven wurden mit den empirischen Daten verglichen. Für die vorgeschlagenen Maßnahmen Geofencing und Inducement wurden technische Machbarkeitsanalysen mittels Simulationen durchgeführt. Über Szenario-Modellierung wurden die CO₂-Auswirkungen verschiedener Regulierungsoptionen für Deutschland und EU27 bis 2040 quantifiziert.

Ergebnisse

PHEV-Realverbrauch im Mittel 5,9 l/100 km und elektrischer Fahranteil ein Viertel

Der mittlere reale Kraftstoffverbrauch liegt bei 5,9 l/100 km und damit um ca. 300 % über dem Typgenehmigungsverbrauch. PHEV zeigen damit auf der Straße einen Kraftstoffverbrauch in der Größenordnung von reinen Verbrennerfahrzeugen. Den Grund dafür zeigt ein Blick auf den elektrischen Fahranteil laut OBFCM-Daten: Dieser liegt lediglich im Bereich von einem Viertel (Streckenanteil mit abgeschaltetem Verbrennungsmotor im Entladebetrieb und energie-basierter elektrischer Fahranteil betragen 27 – 31 %).

Messgrößen der Typgenehmigung lassen nicht auf den elektrischen Fahranteil schließen

Regulatorisch wird zwischen Entladebetrieb (engl. *Charge Depleting Mode* – CD-Mode) und Ladeerhaltungsmodus (engl. *Charge Sustaining Mode* – CS-Mode) unterschieden. Der CD-Mode ist

regulatorisch dadurch definiert, dass über einen WLTP-Zyklus eine bestimmte Mindestmenge der Fahrenergie aus der Batterie stammen muss aber nicht welcher Anteil der Strecke rein elektrisch zurückgelegt werden muss. Dies eröffnet große Spielräume für den Einsatz des Verbrennungsmotors auch im Entladebetrieb. Die OBFCM-Daten ergeben, dass PHEV etwa 40 % ihrer Strecke im CD-Mode unterwegs sind, wobei sie einen realen Verbrauch von im Schnitt etwa 2,8 l/100 km aufweisen und damit deutlich mehr als in der Typgenehmigung. Dies zeigt, dass der Verbrennungsmotor in diesem Modus auch in der Praxis eine erhebliche Rolle spielt. Im CS-Mode liegt der Kraftstoffverbrauch mit im Mittel 7,4 l/100 km allerdings noch deutlich höher.

Laden erhöht nur CD-Mode-Anteil und kaum den elektrischen Fahranteil

Ein wesentlicher Ansatzpunkt zur Steigerung des Klimanutzens von PHEV war bisher die Ermöglichung häufigen Ladens. Die OBFCM-Daten wurden deshalb darauf analysiert, wie sich konsequentes Laden der Fahrzeuge (= hoher beobachteter CD-Mode-Anteil) auf den Verbrauch auswirkt. Zwar zeigt sich, dass der mittlere Kraftstoffverbrauch mit dem Anteil im CD-Mode und damit mit der Ladehäufigkeit sinkt. Der Kraftstoffverbrauch unterschreitet dabei jedoch grundsätzlich nicht den CD-Mode-Verbrauch von 2,8 l/100 km. Aktuelle PHEV verbrauchen also im Flottenmittel nie weniger als 2,8 l/100 km bzw. 65 gCO₂/km, unabhängig davon, wie oft sie geladen werden (Abbildung 1).

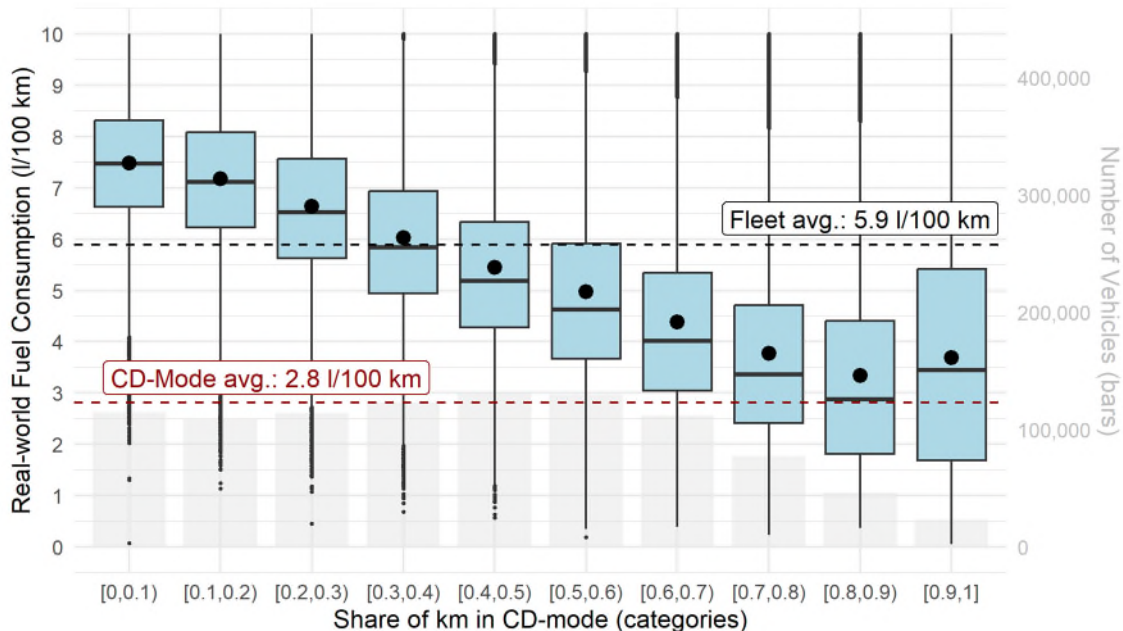


Abbildung 1: Realverbrauch in Abhängigkeit des CD-Mode-Anteils.

Quelle: Eigene Berechnungen

Die Utility-Factor-Kurve muss stärker als 2027 angepasst werden

Nach der EU-Flottenzielwertregulierung wird der Utility Faktor (also der Zusammenhang zwischen Reichweite im CD-Mode und CD-Mode-Anteil im kombinierten WLTP-Verbrauchswert) ab Anfang 2026 sowie ab Anfang 2028 für alle neu zugelassenen PHEV angepasst; für neu homologierte Fahrzeuge treten die Anpassungen jeweils bereits ein Jahr früher in Kraft. Der VDA schlug vor, die anstehenden Anpassungen auszusetzen. Auf Basis der OBFCM-Daten und Typgenehmigungswerte wurde in der vorliegenden Studie näherungsweise berechnet, wie stark die Realverbräuche der aktuellen PHEV für unterschiedliche Ausgestaltungen der Utility-Faktor-Kurve von den Typgenehmigungswerten abweichen würden. Abbildung 2 zeigt die Lücke zwischen realen und nominalen Kraftstoffverbräuchen der PHEV nach der bislang gültigen UF-Kurve sowie für die beiden Anpassungen

2025 und 2027. Zusätzlich wurde berechnet, wie die UF-Kurve parametrisiert werden müsste, damit PHEV real im Mittel nur noch 20 % mehr als nach Typgenehmigung verbrauchen, so wie rein verbrennungsmotorische Fahrzeuge heute.

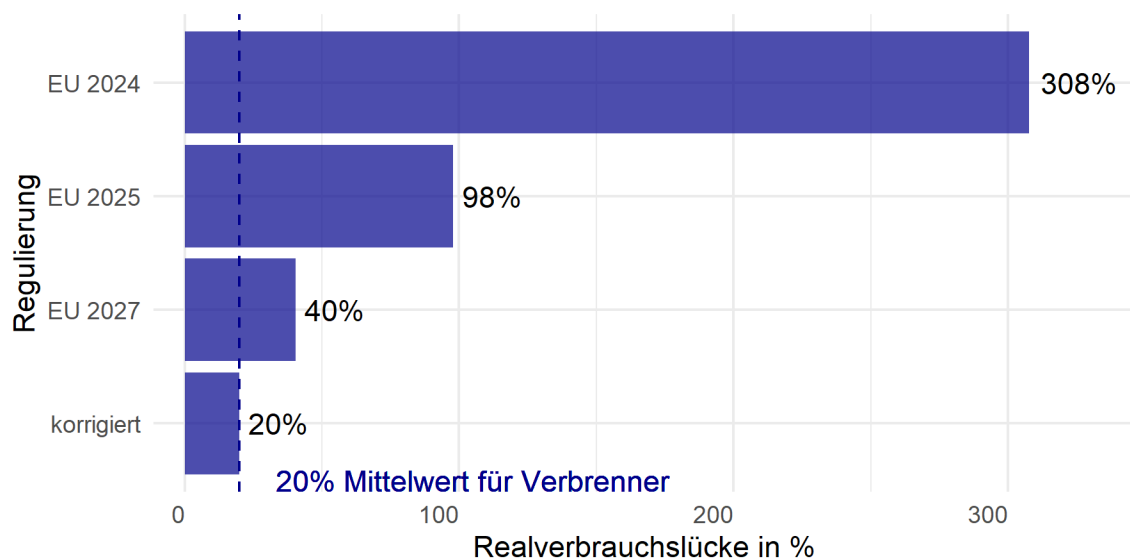


Abbildung 2: Differenz zwischen WLTP- und Realverbrauch von PHEV in Europa nach verschiedenen Regulierungen

Quelle: Eigene Berechnungen

Tabelle 1: Übersicht Skalierungsparameter und Verbrauchslücken nach Utility-Faktoren

Utility-Faktor-Kurven-Ansatz	d_n [km]	Mittlere Verbrauchslücke
EU-Regulierung bis 2024	800	>300 %
EU-Regulierung 2025–2026	2 200	≈ 100 %
EU-Regulierung ab 2027	4 260	≈ 40 %
Empirisch korrigierter UF	≈ 7200	≈ 20 %
Weitere Realdaten-UF-Ansätze	4 700 – 5 900	≈ 25 – 35 %

Quelle: Eigene Berechnungen

Alle PHEV in der Stichprobe wurden nach der Regulierung bis 2024 zugelassen und liegen im Mittel ca. 300 % über der Typgenehmigung. Diese Lücke zwischen Real- und Nominalverbrauch würde im Mittel noch ca. 100 % betragen, wenn die Fahrzeuge nach der 2025-Regulierung zugelassen worden wären und noch 40 % nach der für 2027 geplanten Regulierung. Damit die Lücke auf ca. 20 % sinkt, müsste der in der Regulierung angepasste Skalierungsparameter von $d_n = 2.200$ km für 2025 und $d_n = 4.260$ km für 2027 noch weiter auf $d_n > 5000$ km steigen. Auch eine Modellierung des UF mit anderen Ansätzen liefern alle Skalierungsparameter $d_n > 4260$ km und eine mittlere Verbrauchslücke von über 20 %, so dass alle Ansätze für eine weitere Verschärfung der UF-Kurve sprechen, um die Realverbrauchslücke weiter zu senken. Auch eine stärkere Berücksichtigung von PHEV mit Reichweiten über 80 km in der Analyse führt zu höheren Skalierungsparametern d_n als in der Regulierung für 2027 vorgesehen, so dass auch neue langreichweitige PHEV eine Verschärfung der UF-Kurve erfordern.

Display-Transparenz und Inducement bewirken nur sehr geringe Emissionssenkung

Die Vorschläge des VDA, dass PHEV-Nutzer im Display transparent den elektrischen Fahranteil dargestellt bekommen („Display-Transparenz“) bzw. zum Laden bspw. mindestens alle 500 km gezwungen werden („Inducement“), können die Realemissionen von PHEV möglicherweise geringfügig senken. Auf Literaturbasis wird für die Maßnahme Display-Transparenz eine Reduktion der Realemissionen von 5 % bzw. 7 g CO₂/km angenommen. Das Inducement könnte auf Basis der Simulation von PHEV-Fahrten eine zusätzliche Senkung der Realemissionen von ca. 2 – 3 g CO₂/km ermöglichen. Abbildung 3 zeigt die Wirkung dieser Maßnahmen im Verhältnis zu den realen Emissionswerten der PHEV-Flotte und im Vergleich zu den WLTP-Werten mit unterschiedlichen UF-Kurven, siehe oben. Es zeigt sich, dass der mittlere reale Emissionswert der PHEV von ca. 145 g CO₂/km durch die vorgeschlagenen Maßnahmen nur geringfügig gemindert werden kann. Die Maßnahmen reichen also bei weitem nicht aus, die Lücke zwischen Real- und Nominalemmissionen relevant zu senken. Dies verdeutlicht die Wichtigkeit der vorgesehenen Anpassungen an der UF-Kurve.

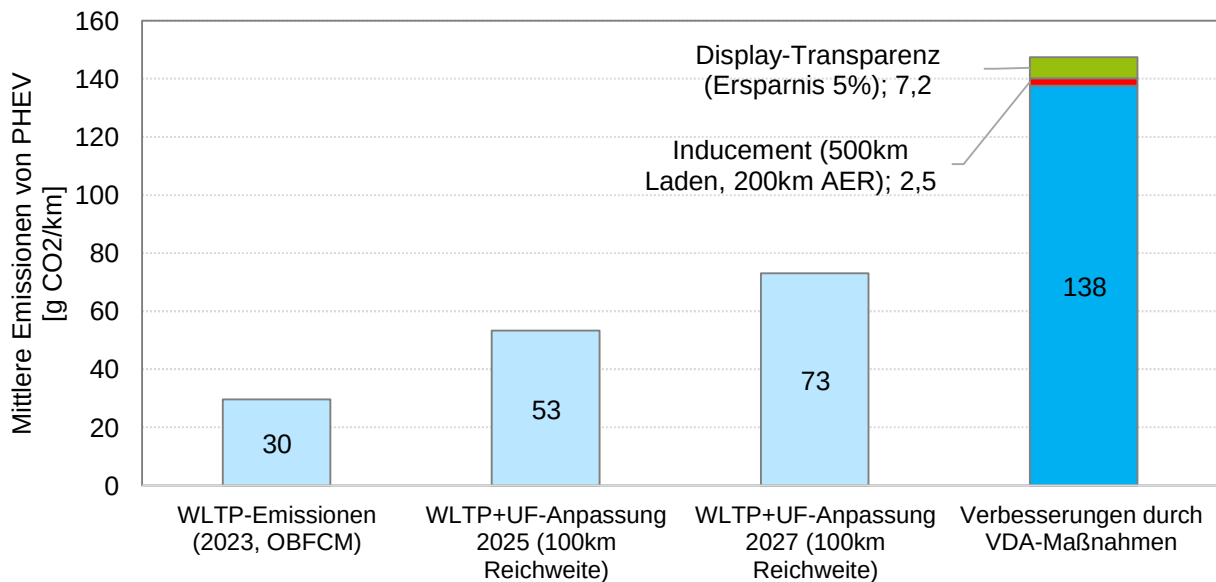


Abbildung 3: Mittlere PHEV-CO₂-Emissionen in verschiedenen Anpassungen

Quelle: Eigene Berechnungen

Auswirkungen auf die THG-Emissionen

Mit dem Modell TEMPS werden auf Basis der Rahmendaten der Treibhausgasprojektionen 2025 (Förster et al. 2025) vier Szenarien mit unterschiedlicher Berücksichtigung der PHEV untersucht und hinsichtlich der THG-Emissionsfreisetzung miteinander verglichen. Szenario S0 ist die Referenz, in der die aktuell rechtlich gültigen Anpassungen des Skalierungsparameters d_n der Jahre 2025 und 2027 für die Bestimmung der CO₂-Emissionen bei der Typengenehmigung in der Modellierung zugrunde gelegt sind. Die beiden Szenarien S1a und S1b bilden die Forderung des VDA ab, so dass in den Jahren 2025 und 2027 keine Anpassung des Skalierungsparameters d_n in der Modellierung stattfindet. Die beiden Szenarien unterscheiden sich dadurch, dass in Szenario S1b für nutzungsseitige Maßnahmen wie Inducement und Geofencing 5 % niedrigere Realverbräuche der PHEV angenommen werden. Szenario S2 ist ein Szenario, in dem die Anpassung des Skalierungsparameters d_n im Jahr 2025 stattfindet, im Jahr 2027 aber keine weitere Anpassung des Skalierungsparameter vorgesehen ist.

Die unterschiedliche Berücksichtigung der PHEV in den Szenarien führt zu unterschiedlichen Antriebsverteilungen der Pkw-Neuzulassungen bis zum Jahr 2035. Das Modell TEMPS berücksichtigt unter anderem eine Kostenoptimierung aus Sicht der Fahrzeughersteller, so dass die niedrigeren WLTP-CO₂-Emissionen der PHEV in den Szenarien S1a, S1b und S2 bis zum Jahr 2030 im Vergleich zur Referenz S0 zu niedrigeren Neuzulassungsanteilen an PHEV sowie Batterie-Pkw und höheren Anteilen an verbrennungsmotorischen Pkw führen. Nach dem Jahr 2030 sind die PHEV- und die verbrennungsmotorischen Neuzulassungsanteile in den Szenarien S1a, S1b und S2 dagegen höher als in der Referenz S0.

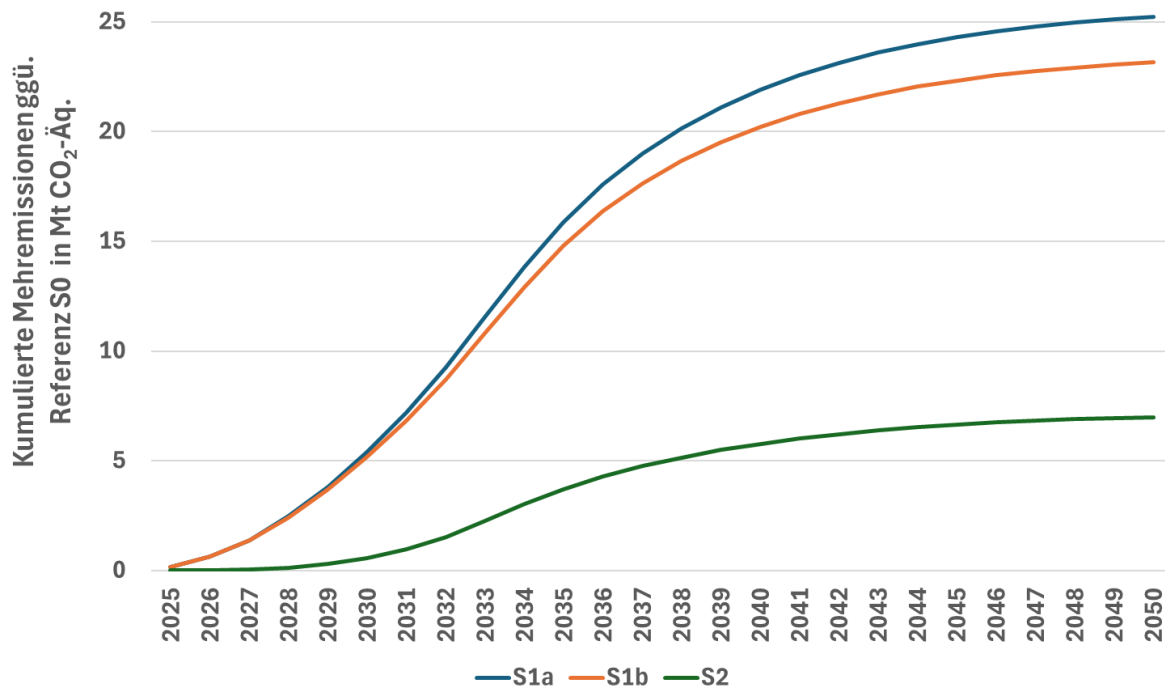


Abbildung 4: Kumulierte THG-Mehremissionen gegenüber der Referenz S0

Quelle: Eigene Berechnungen

Die veränderten Neuzulassungsstrukturen und stärkeren Neuzulassungsanteilen an Pkw mit Verbrennungsmotoren führen in den Szenarien S1a, S1b und S2 zu höheren THG-Emissionen als in der Referenz S0, in der die beiden Anpassungen des Skalierungsparameters d_n der Jahre 2025 und 2027 berücksichtigt sind. In dem Fall, dass die beiden Anpassungsschritte des Skalierungsparameters nicht stattfinden (Szenario S1a und S1b), kumulieren sich die THG-Mehremissionen bis zum Jahr 2045 auf 23,2 bzw. 25,2 Mt CO₂-Äq. auf. Bei der Aussetzung der Anpassung des Skalierungsparameters im Jahr 2027 (S2) steigen die Mehremissionen kumuliert insgesamt auf 7 Mt CO₂-Äq.

Die Emissionsberechnung von PHEV muss an die Realität angepasst werden

Wie im vorliegenden Papier gezeigt, lassen sich aus den Realverbrauchsdaten (OBFCM-Daten) evidenzbasierte Utility Faktoren bestimmen. Hiermit kann die Realverbrauchsabweichung von PHEV auf ein ähnliches Niveau wie bei reinen Verbrennerfahrzeugen abgesenkt und damit ein fairer Vergleich zwischen den Antrieben hergestellt werden. Eine solche Anpassung sollte auf Basis der kontinuierlich erhobenen OBFCM-Daten zukünftig regelmäßig erfolgen. In jedem Fall sollten die aktuell gesetzlich vorgesehenen Anpassungen des Utility Factors durchgeführt werden, da sie die Lücke

zwischen Norm- und Realverbräuchen gegenüber dem bisherigen Stand zumindest deutlich verkleinern.

1. Einleitung

1.1. Motivation, Zielsetzung und Hintergrund

Plug in-Hybridfahrzeuge (PHEV) kombinieren einen elektrischen mit einem konventionellen Verbrennungsmotorischen Antrieb und wurden in der Europäischen Union (EU) über viele Jahre als ein Baustein der Dekarbonisierung des Pkw-Bestands betrachtet. Im Rahmen der CO₂-Flottengrenzwerte leisten sie rechnerisch einen signifikanten Beitrag zur Zielerreichung, da ihre anrechenbaren Emissionen auf Basis des Typprüfverfahrens berechnet werden. Diese Konzeption war regulatorisch attraktiv, da PHEV gegenüber batterieelektrischen Fahrzeugen eine geringere Transformation der Infrastruktur erfordern und gleichzeitig kurzfristige Entlastung im Rahmen der CO₂-Regulierung ermöglichen.

Die derzeit laufende Novellierung der Flottenregulierung sowie die Einführung und Weiterentwicklung der Utility-Factor-Methodik inkl. der angedachten Verschärfung der Typpgenehmigungsemissionen von PHEV ab 2027 verschieben den Fokus hin zu realitätsnäheren elektrischen Fahranteilen und realweltlichen Emissionen. Insbesondere die nun verfügbaren realen Nutzungsdaten auf Basis des On-Board-Fuel-Consumption-Metering (OBCFM) zeigen, dass PHEV im Alltagsbetrieb deutlich geringere elektrische Fahranteile aufweisen als in der Typpgenehmigung unterstellt. Vor diesem Hintergrund fordern Industrievertreter wie der Verband der Automobilindustrie (VDA), eine justierte Anrechnung elektrischer Kilometer und flexiblere Übergangszeiträume.

Die vorliegende Untersuchung ordnet PHEV vor diesem regulatorischen Rahmen ein, analysiert umfassende Realdaten und bewertet den elektrischen Fahranteil sowie der Emissionsanrechnung. Ziel ist es, technische Definition, regulatorische Bewertung und realweltliche Performance in Beziehung zu setzen und die daraus resultierenden Implikationen für künftige Flottenregulierungen zu beleuchten.

Die vorliegende Analyse bewertet auch die einzelnen Vorschläge des VDA zur Regulierung von Plug-in-Hybrid-Fahrzeugen (PHEV) im Rahmen der europäischen CO₂-Flottenregulierung. Der VDA hat in zwei Positionspapieren (Mai und Oktober 2025) folgende Hauptforderungen formuliert:

1. Aussetzung der geplanten Verschärfung des Utility Factors ab 2026
2. Einführung von Maßnahmen wie Geofencing, Display-Transparenz und Inducement zur Steigerung des elektrischen Fahranteils
3. Anerkennung von PHEV als zulassungsfähige Fahrzeugkategorie auch nach 2035

Die Bewertung erfolgt wissenschaftlich neutral auf Basis aktueller empirischer Daten und unter Berücksichtigung klimapolitischer, technischer und wirtschaftlicher Aspekte.

Das vorliegende Papier gliedert sich wie folgt. Im nächsten Abschnitt 1.2 wird der regulatorische Hintergrund sowie Details der Betriebsmodi und Definitionen von PHEV für die vorliegende Studie ausführlich dargelegt. Kapitel 2 stellt kurz die Daten und verwendeten Methoden vor, Kapitel drei enthält die Ergebnisse zu den empirischen Analysen der OBCFM-Daten (Abschnitt 3.1), der Bewertung der VDA-Forderungen (Abschnitt 3.2), der Auswirkungen auf den Markthochlauf alternativer Antriebe (Abschnitt 3.3) sowie eine Diskussion einer möglichen Weiterentwicklung der Europäischen CO₂-Flottengrenzwerte mit Blick auf PHEV auch nach 2035.

1.2. Hintergrund PHEV

1.2.1. Übersicht und Betriebsmodi

PHEV verfügen über einen elektrischen und einen Verbrennungsmotor und eine Batterie, die über das Stromnetz geladen werden kann. Damit können PHEV in der Regel gewisse Strecken rein elektrisch fahren und bei hohen Leistungsanforderungen oder langen Strecken verbrennungsmotorisch. In der Regulierung wird dabei ein eher elektrischer Betriebsmodus und ein hauptsächlich Verbrennungsmotorischen Betrieb unterschieden. Die Definitionen nach Verordnung (EU) 2017/1151, Anhang XXI, 3.3 lauten dabei:

- „Betrieb bei Entladung“ (Charge-depleting operating condition – CD-Mode) bezeichnet eine Betriebsart, in der bei fahrendem Fahrzeug die im wiederaufladbaren Speichersystem für elektrische Energie (REESS) gespeicherte Energie zwar schwankt, im Durchschnitt jedoch abnimmt, bis der Übergang zum Betrieb bei gleichbleibender Ladung erreicht ist.¹
- „Betrieb bei gleichbleibender Ladung“ (Charge-sustaining operating condition – CS-Mode) bezeichnet eine Betriebsart, in der bei fahrendem Fahrzeug die im REESS gespeicherte Energie zwar schwankt, im Durchschnitt jedoch auf einem neutralen, ladungsausgleichenden Niveau verbleibt.²

Das heißt beim Entlade-Modus „CD-Mode“ kommt ein relevanter Teil der Energie für die Bewegung des Fahrzeugs aus der Batterie. Dieser Modus ist aber nicht rein elektrisch, d.h. der Verbrennungsmotor kann und wird genutzt werden. Dieser Modus wird aber oft als überwiegend elektrisch angesehen (zur genauen Definition und den realen Ergebnissen – siehe unten).

Je nach Batterie und Fahrzeug werden verschiedene Reichweite im CD-Modus und rein elektrisch definiert. Nach Verordnung (EU) 2017/1151, Anhang XXI, 3.3 sind dies:

- „Tatsächliche Reichweite bei Entladung“ (*Charge-depleting actual range* – **R_{CDA}**) bezeichnet die in einer Reihe von WLTC-Zyklen bei Entladung zurückgelegte Strecke bis zu dem Zeitpunkt, an dem das wiederaufladbare Speichersystem für elektrische Energie (REESS) entladen ist.³
- „Reichweite der Zyklen bei Entladung“ (*Charge-depleting cycle range* – **R_{CDC}**) bezeichnet die Strecke, die vom Beginn der Prüfung bei Entladung bis zum Ende des letzten Zyklus zurückgelegt wurde, der vor dem Zyklus oder den Zyklen erfolgte, der oder die das Kriterium für den Abbruch erfüllt oder erfüllen, einschließlich des Übergangszyklus, in dem das Fahrzeug sowohl bei Entladung als auch bei gleichbleibender Ladung betrieben wurde.⁴
- „Vollelektrische Reichweite (Hybrid)“ (*All-electric range* - **AER**) bezeichnet die insgesamt von einem extern aufladbaren Fahrzeug mit Hybrid-Elektroantrieb zurückgelegte Strecke, gerechnet ab dem Beginn der Prüfung mit Entladung bis zu dem Zeitpunkt während der Prüfung, an dem der Verbrennungsmotor beginnt, Kraftstoff zu verbrauchen.

Die Typgenehmigung von PHEV funktioniert nun im Wesentlichen so, dass die Fahrzeuge zuerst vollgeladen werden und dann nacheinander mehrere WLTP-Testzyklen vollständig durchfahren. Bei jedem Zyklus wird geprüft, wieviel Energie für die Bewegung durch den Zyklus aus der Batterie kam

¹ Wörtlich nach Verordnung (EU) 2017/1151, Anhang XXI, 3.3

² Wörtlich nach Verordnung (EU) 2017/1151, Anhang XXI, 3.3

³ Wörtlich nach Verordnung (EU) 2017/1151, Anhang XXI, 3.3

⁴ Wörtlich nach Verordnung (EU) 2017/1151, Anhang XXI, 3.3

und wie viel Energie insgesamt notwendig war. Nach einer gewissen Zeit, wenn die Batterie stark entladen ist oder eine Fahrsituation besonders anspruchsvoll ist, wird zusätzlich der Verbrennungsmotor anspringen. Die Reichweite, bei der das erste Mal der Verbrennungsmotor angesprungen ist, wird als elektrischer Reichweite bezeichnet und bei den offiziellen Fahrzeugwerten stets mit ausgegeben. Der Rest des Testzyklus und einer oder mehrere Zyklen werden dann noch unter Verwendung des Verbrennungsmotors gefahren. Dieses Messverfahren für PHEV nach WLTP ist schematisch in Abbildung 5 dargestellt.

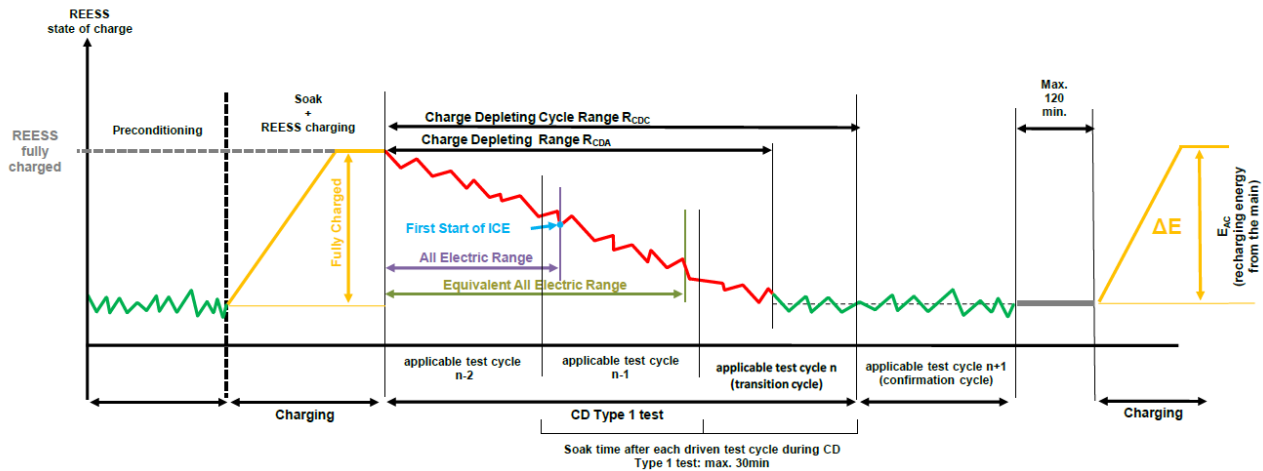


Abbildung 5: Schematisches WLTP-Messverfahren für PHEV

Quelle: Verordnung (EU) 2017/1151, Anhang XXI

Je nach elektrischer Reichweite und Auslegung des Fahrzeuges können unterschiedlich lange Strecken rein elektrisch oder überwiegend elektrisch zurückgelegt werden. Im Typgenehmigungsverfahren wird das Fahrzeug daher sowohl im überwiegend elektrischen CD-Mode. Gemessen als auch im überwiegend verbrennungsmotorischen CS-Mode. Wichtig für die reale CO₂-Emissionen ist nun unter anderem die Frage, welche Anteile diese Fahrzeuge real im überwiegend elektrischen Modus und welche Anteile sie überwiegend nicht elektrisch zurücklegen. Dafür wurde die Kenngröße der Nutzfaktoren, engl. *Utility Factor*, eingeführt. Verordnung (EU) 2017/1151, Anhang XXI, 3.3, definiert diese Nutzfaktoren wie folgt:

- „Nutzfaktoren“ (*Utility Factors* - **UFs**) sind Verhältniswerte auf der Grundlage von Fahrstatistiken; sie hängen von der im Betrieb bei Entladung erzielten Reichweite ab und werden zur Gewichtung der Verbindungen von Abgasemissionen bei Entladung und bei gleichbleibendem Ladezustand, der CO₂-Emissionen und des Kraftstoffverbrauchs von extern aufladbaren Fahrzeugen mit Hybrid-Elektroantrieb verwendet.⁵

Grundsätzlich sind die UF also Gewichtungsfaktoren für die Berechnung von Kraftstoffverbrauch, Abgasemissionen und CO₂-Emissionen, die angeben welche Fahranteile überwiegend elektrisch und welche überwiegend verbrennungsmotorisch zurückgelegt werden. Dabei soll nochmals betont werden, dass die Regulierung nicht zwischen Strecken mit Verbrennungsmotor an und Verbrennungsmotor aus gewichtet, sondern nur zwischen Stecken im CD- und CS-Mode. Wie nah der CD-Mode an einen rein elektrischen Betrieb kommt, hängt damit von den Details der CD-Mode-Definition und dem Fahrzeugbetrieb ab.

⁵ Wörtlich nach Verordnung (EU) 2017/1151, Anhang XXI, 3.3

1.2.2. Definition Charge-Depleting-Mode

Die WLTP-Prüfprozedur für Plug-in-Hybridfahrzeuge endet die Charge-Depleting-Phase (CD-Mode) nicht über einen festen SOC-Wert, sondern über ein energetisches „Break-off“-Kriterium, das die relative Netto-Entnahme elektrischer Energie während eines vollständigen WLTP-Zyklus betrachtet. Formal definiert die Norm die relative elektrische Energieänderung $REEC_i$ für Zyklus i als Quotienten aus der absoluten Nettoenergieänderung der Batterie (Rechargeable Energy Storage System – RE-ESS) und der Energieanforderung des WLTP-Zyklus (unter Einbeziehung des Umrechnungsfaktors $1/3600$ zur Einheitstransformation):

$$REEC_i = \frac{|\Delta E_{REESS,i}|}{E_{\text{cycle}}/3600}$$

Die Break-off-Bedingung des Charge-Depleting-Tests ist erreicht, wenn die relative elektrische Energieänderung des Hochvoltspeichers (REEC) in einem WLTP-Zyklus unter 4 % der normierten Zyklusenergie fällt. Dies bedeutet, dass sich der Ladezustand der Batterie über den Zyklus nur noch geringfügig ändert und das Fahrzeug energetisch in einen quasi-stationären Betriebszustand übergegangen ist. Die Definition trifft jedoch keine Aussage darüber, welcher Anteil der Antriebsenergie tatsächlich elektrisch oder durch den Verbrennungsmotor bereitgestellt wird. Der erste Zyklus, in dem dies eintritt, markiert nach den Vorschriften das Ende der CD-Sequenz und leitet Übergangs- und Bestätigungszyklen ein. Diese Vorschrift ist in UN-ECE-Regulation No.154 / WLTP-Anhang formal niedergelegt und ebenso in der einschlägigen EU-Umsetzung dokumentiert.⁶

Auch wenn die WLTP-Break-off-Bedingung keinen expliziten elektrischen Fahranteil vorgibt, lässt sich aus typischen Fahrzeugauslegungen und Betriebsstrategien heutiger PHEV ein plausibler Bereich ableiten. In der Praxis wird der Verbrennungsmotor gegen Ende des CD-Modes bei vielen Modellen regelmäßig zugeschaltet, etwa zur Leistungsunterstützung bei höheren Lasten, zur thermischen Konditionierung oder zur Stabilisierung des Ladezustands. Gleichzeitig bleibt der Elektromotor häufig weiterhin aktiv, insbesondere bei niedrigen Lasten, im urbanen Zyklusanteil oder über Rekuperation. Daraus ergibt sich, dass der elektrisch bereitgestellte Anteil der Antriebsenergie im letzten CD-Zyklus typischerweise deutlich unter 100% liegt und häufig im Bereich von etwa 20 bis 50% anzusiedeln sein sollte. Je nach Fahrzeugkonzept, Leistungsanforderung und Betriebsstrategie sind auch deutlich niedrigere Anteile möglich, während sehr hohe elektrische Anteile vor allem bei stark elektrifizierten, electric-first-orientierten oder Range-Extender-ähnlichen Konzepten auftreten.

Abbildung 6 illustriert das WLTP-Messverfahren und die CD-Mode-Definition. Im oberen Panel ist das wiederholte Geschwindigkeitsprofil der WLTP-Zyklen dargestellt, die im CD-Betrieb nacheinander gefahren werden. Das mittlere Panel zeigt die kumulierte Fahrstrecke und markiert die All-Electric Range, während gleichzeitig sichtbar wird, ab welchem Zeitpunkt Kraftstofffluss auftritt und der Verbrennungsmotor zunehmend beteiligt ist. Entscheidend ist das untere Panel, das die Entwicklung der Batterieenergie sowie den relativen elektrischen Energieanteil (REEC) darstellt. Hier wird deutlich, dass der CD-Mode nicht mit einem vollständig elektrischen Betrieb gleichzusetzen ist, sondern über einen Übergangszyklus endet, in dem der elektrische Anteil stark abnimmt. Die Break-off-Bedingung wird erst dann erfüllt, wenn der REEC-Wert im Bestätigungszyklus unter die

⁶ Technisch ist hierbei zu betonen, dass $\Delta E_{REESS,i}$ eine Nettoenergiegröße ist, bestimmt durch die Integration von Batteriespannung und -strom über die Zyklusdauer (Messgröße: $U_{REESS}(t) \cdot I_{REESS}(t)$ über t_{start} bis t_{end}). Demgegenüber beschreibt E_{cycle} die mechanische oder traktionsseitige Energieanforderung des WLTP-Fahrzyklus, berechnet aus der Momentanleistung, die nötig ist, um die normierte Geschwindigkeitszeitreihe abzudecken (d.h. Beschleunigungsarbeit plus Fahrwiderstände, abzüglich Rekuperationseffekte). Damit ist $REEC_i$ ein dimensionsloser Anteil, der angibt, wie groß die Netto-Batterieentnahme relativ zur Zyklusenergie war. Weiterhin wählt die Norm bewusst die Nettoenergie als objektive, technologie-neutrale Bezugsgröße statt eines herstellereigenen SOC-Prozents, um Manipulationen über SOC-Offsets zu erschweren und die Vergleichbarkeit der Tests zu erhöhen.

regulatorische Schwelle fällt, was zeigt, dass der CD-Mode auch bei bereits dominierendem Verbrennungseinsatz formal weiterläuft. Damit veranschaulicht die Abbildung die zentrale regulatorische Logik, nach der der CD-Mode energetisch und nicht über einen expliziten elektrischen Fahranteil definiert ist.

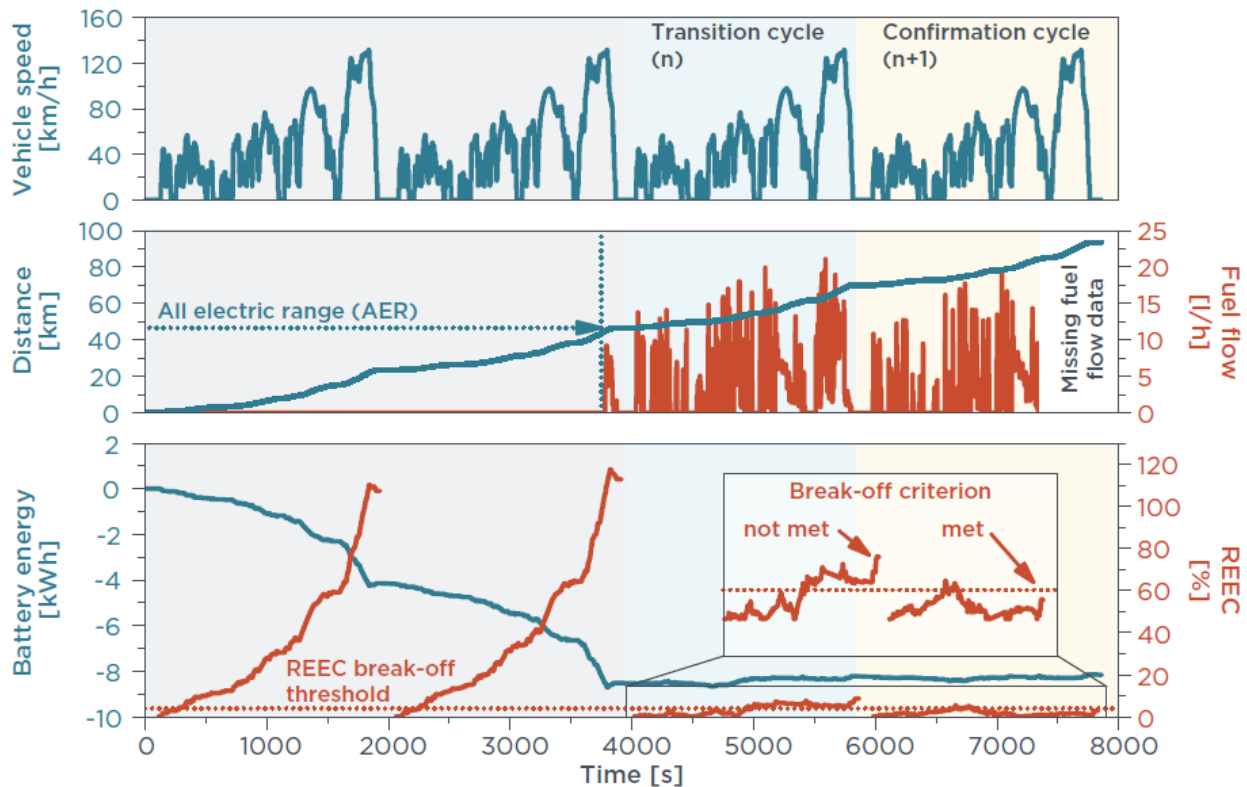


Abbildung 6: Definition des Charge-Depleting-Mode an einem Fahrzeug-Beispiel

Quelle: Dornoff (2021)

Zentral ist, dass der CD-Mode im WLTP kein elektrisch definierter Fahrmodus ist, sondern ein energetisch balanzierter Übergangsbereich zwischen Entlade- und Ladehaltungsbetrieb. Die 4%-Schwelle bezieht sich ausschließlich auf die Nettoänderung des Batterieenergieinhalts und lässt damit eine große Bandbreite an realen Antriebsstrategien zu, von überwiegend elektrischem Betrieb bis hin zu stark verbrenner-dominiertem Hybridbetrieb. Folglich bildet der Utility Factor auf Basis des CD-Modes keinen elektrischen Fahranteil im engeren Sinne ab, sondern lediglich den Anteil der Fahrleistung, die unter diesen energetischen Randbedingungen erbracht wird. Dies erklärt, warum hohe UF-Werte regulatorisch möglich sind, ohne dass zwangsläufig entsprechend niedrige reale CO₂-Emissionen erreicht werden, und warum OBFCM-Daten systematisch zeigen, dass reale Emissionen vieler PHEV deutlich über den aus dem Typgenehmigungsverfahren abgeleiteten Werten liegen.

Praktisch führt der niedrige Schwellenwert von 4% Energieinhalt dazu, dass die CD-Phase sehr spät abgebrochen wird; es ist also möglich und regulatorisch zulässig, dass bereits sehr hohe Verbrenneranteile in den letzten CD-Zyklen vorherrschen, obwohl das Break-off-Kriterium formal noch nicht erreicht ist. Das heißt, dass die normative CD-Reichweite dadurch großzügig interpretiert werden kann und folglich die in regulatorischen UF-Modellen verwendeten elektrischen Anteile überschätzt werden. Anders ausgedrückt: das REEC-Kriterium schützt die Standardisierbarkeit des Testablaufs, erlaubt aber gleichzeitig einen beträchtlichen verbleibenden ICE-Beitrag, bevor der CD-Modus

offiziell beendet wird. Diese Eigenschaft erklärt teilweise die beobachtete Diskrepanz zwischen WLTP-basierten Annahmen (UF-Kurven) und realen OBFCM-Messungen der elektrisch gefahrenen Kilometer.

Aus regulatorischer Perspektive hat die Wahl dieses Schwellenwerts Vor- und Nachteile. Einerseits verhindert ein zu hoher REEC-Schwellenwert willkürliche Vorverlagerung des Abbruchs durch Herstellersoftware oder SOC-Pufferung; andererseits bewirkt ein sehr niedriger Schwellenwert eine systematische Überschätzung des „elektrisch möglichen“ Fahranteils, sofern nur die CD-Reichweite zur Abschätzung realer Nutzung herangezogen wird.⁷

Fazit: Der CD-Mode nach WLTP ist kein elektrischer Fahrmodus, sondern ein energetisch definierter Übergangsbereich. Der Utility Factor (siehe unten) ist in der Regulierung ein CD-Mode-Anteil und ist damit kein elektrischer Fahranteil.

1.2.3. Utility Faktoren

Im Rahmen der Bewertung der realweltlichen Emissionsperformance von PHEV spielen Utility-Faktoren (UF) bzw. Nutzungsanteile eine zentrale Rolle. Grundsätzlich lassen sich zwei Kategorien von UF unterscheiden, die in der Regulierung, der Typprüfung und in der empirischen Fahrleistungsanalyse mit OBFCM-Daten Anwendung finden: der CD-Mode-basierte Utility Factor (UF_{CD}) und der elektrische Fahranteil (UF_{real}). Beide Größen stehen in Beziehung zur elektrischen Nutzbarkeit von PHEV, verfolgen jedoch unterschiedliche Zwecke und beruhen auf unterschiedlichen Datengrundlagen.

Der UF_{CD} beschreibt den Anteil der im CD-Mode gefahrenen Kilometer an der gesamten Fahrleistung. Im Typprüfverfahren nach WLTP wird dieser Anteil als Funktion der CD-Mode-Reichweite R_{CDC} modelliert. Der UF_{CD} ist damit eine verhaltens- und technologiebezogene Kenngröße. Er gibt Auskunft darüber, welche Streckenanteile ein PHEV typischerweise ohne Reichweitenlimitierung im überwiegend elektrischen aber nicht rein elektrischen Modus zurücklegen kann, bevor das Fahrzeug in den Charge-Sustaining-Modus übergeht. Im Gegensatz dazu ist die Reichweite im rein elektrischen Modus AER, das ist die im Testzyklus zurückgelegte Reichweite, bevor das erste Mal der Verbrennungsmotor anspringt. Im regulatorischen Kontext besitzt UF_{CD} die Funktion, aus der zertifizierten elektrischen Reichweite abzuleiten, wie groß der zu berücksichtigende elektrische Fahranteil im Typprogenehmigungsverfahren sein darf. UF_{CD} ist damit vorrangig ein Berechnungsinstrument, das die emissionsseitige Bewertung der Herstellerflotten gemäß CO₂-Vorgaben beeinflusst.

Demgegenüber bildet der UF_{real} den realen Anteil elektrisch zurückgelegter Kilometer an der Gesamtfahrleistung ab, d.h. der Anteil aller Kilometer mit Verbrennungsmotor aus an den Gesamtkilometern. Im Gegensatz zu UF_{CD} ist UF_{real} nicht technologie- oder typprüfungsbedingt definiert, sondern emissionsrelevant: UF_{real} bestimmt, wie hoch der reale elektrische Nutzungsgrad eines PHEV im Fahrbetrieb ausfällt und korreliert damit direkt mit CO₂- und Kraftstoffverbrauchswerten. Diese Unterscheidung ist wesentlich, denn UF_{CD} ist immer größer oder gleich UF_{real} , da CD-Mode-Kilometer nicht zwingend rein elektrisch gefahren werden, während UF_{real} ausschließlich jene Kilometeranteile berücksichtigt, die real ohne Verbrennungsmotor erfolgen.

⁷ Vor dem Hintergrund verfügbarer OBFCM-Daten (siehe Ergebniskapitel später) ist es eher zu empfehlen, die CD-Prüfdefinition beizubehalten, jedoch die regulatorische Gewichtung zu ändern: CD-Mode-Reichweite (R_{CDC}) und elektrische Reichweite (AER) eignen sich zur technischen Mindestanforderung, die emissionsrelevante Compliance sollte hingegen auf echten, OBFCM-gestützten Metriken beruhen (z. B. km-gewichteter UF_{real}). Solche datenbasierten Validierungen schließen die Lücke zwischen nettoenergetischer Testdefinition und tatsächlicher emissionswirksamer Nutzung.

Die Frage der Vergleichbarkeit beider Konzepte ergibt sich aus der Tatsache, dass sie auf unterschiedlichen Systemgrenzen beruhen. UF_{CD} misst das vom Fahrzeug angebotene elektrische Operationsfenster, UF_{real} hingegen die tatsächliche Nutzung dieses Fensters für elektrisches Fahren im Verkehr. Eine direkte Gleichsetzung beider Kennzahlen war unter WLTP-Regelungslogik vorteilhaft, da ausreichend präzise Realwelt-Nutzungsdaten fehlten und CD-Mode-Reichweiten als strukturelle Proxygröße dienten. Mit der Einführung von OBFCM-Systemen entfällt dieser Notbehelf. OBFCM liefert gezielte Messgrößen zu elektrischen und verbrennungsmotorischen Kilometeranteilen sowie zu Fahrzuständen, sodass UF_{CD} und UF_{real} erstmals empirisch getrennt, quantifiziert und in Beziehung gesetzt werden können.

In der Regulierung tritt der UF explizit auf zur Berechnung der mittleren CO_2 -Emissionen und Kraftstoffverbräuche sowie der Phasengewichtung im Testzyklus. Für die mittleren Kraftstoffverbräuche gibt der UF den angenommenen Anteil CD-Mode-Fahrten eines PHEV in Abhängigkeit von seiner CD-Mode-Reichweite R_{CDC} an:

$$UF(x, d_n) = 1 - \exp \left[- \sum_{i=1}^{10} c_i \left(\frac{x}{d_n} \right)^i \right],$$

Dabei ist x eine Reichweite in km, die numerischen Konstanten sind $c_1 = 26,25$; $c_2 = -38,94$; $c_3 = -631,05$; $c_4 = 5964,83$; $c_5 = -25095$; $c_6 = 60380,2$; $c_7 = -87517$; $c_8 = 75513,8$; $c_9 = -35749$; $c_{10} = 7154,94$ (Verordnung (EU) 2017/1151, Anhang XXI). Der Skalierungsfaktor $d_n = 800$ km für alle vor 2025 neuzugelassenen PHEV. Für die Gewichtung der Emissionen einer Testzyklusphase wird der gleiche UF sukzessiv auf die aufeinanderfolgenden Phasen angewandt, d.h. der UF für Phase j ist:

$$UF_j(x, d_n) = 1 - \exp \left[- \sum_{i=1}^{10} c_i \left(\frac{x}{d_n} \right)^i \right] - \sum_{l=1}^{j-1} UF_l = 1,$$

dabei ist x die bis zum Ende von Phase j zurückgelegte Strecke in km.

1.2.4. Bestehende und geplante Änderungen der Utility-Faktoren

Aufgrund der hohen Abweichungen zwischen realen Emissionen und Typ Genehmigungswerten hat die EU die Utility-Faktor-Berechnung für PHEV verschärft. Die Verschärfung erfolgt über eine Änderung des Skalierungsparameters d_n : Bis einschließlich 2024 galt $d_n = 800$ km, ab 2025 (gültig seit 1.1.2025 für neue Typen, ab 1.1.2026 für alle neuzugelassenen PHEV) gilt $d_n = 2.200$ km sowie ab 2027 (geplant ab 1.1.2027 für neue Typen, ab 1.1.2028 für alle) dann $d_n = 4.260$ km.

Auch in China haben die hohen Abweichungen zwischen Real- und Nominalverbräuchen von PHEV zu einer Änderung der Utility-Faktoren geführt (ICCT 2025). Die bisherigen, aktuellen und zukünftigen UF-Kurven für Europa und China sind in Abbildung 7 gezeigt.

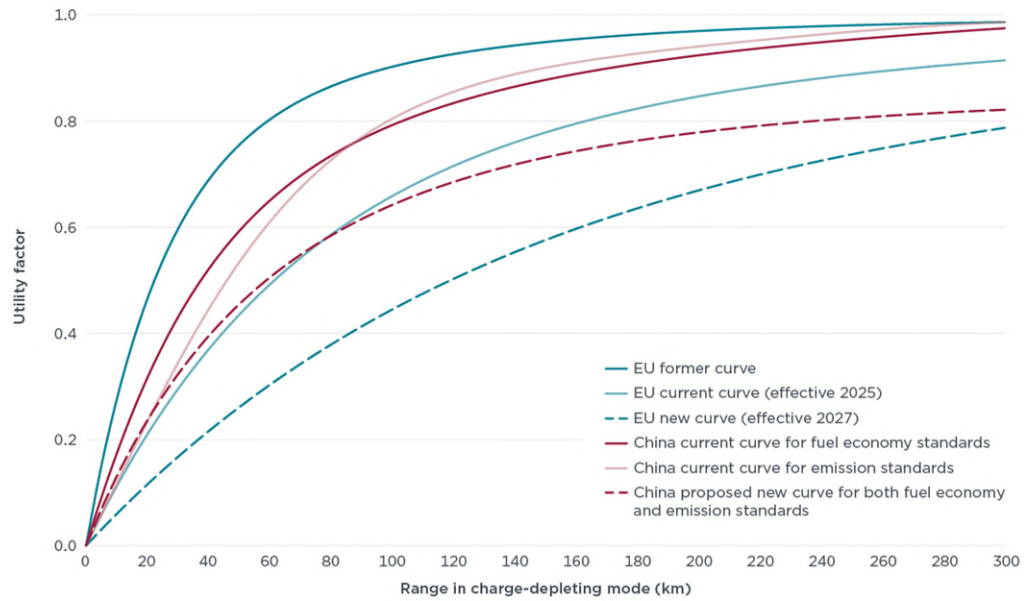


Abbildung 7: Utility-Faktor-Kurven für Europa und China.

Quelle: ICCT (2025)

2. Daten und Methodik

2.1. Empirische Grundlage: OBFCM-Daten

Die Analyse basiert auf On-Board Fuel Consumption Monitoring (OBFCM) Daten der European Environment Agency (EEA) von PHEV, die zwischen 2021 und 2023 in Europa neuzugelassen wurden (vgl. EEA 2025). Die Daten umfassen drei Berichtsperioden (2021–2023) mit insgesamt 1.378.211 Beobachtungen. Der größte Anteil stammt aus dem Jahr 2023 (ca. 61 %).

Tabelle 2: Anzahl PHEV nach Kraftstoff und Jahr

Jahr	Benzin-PHEV	Diesel-PHEV
2023	757.087	85.210
2022	350.625	64.938
2021	95.456	24.895
Gesamt	1.203.168	175.043

Quelle: Eigene Berechnungen

Benzin-PHEV dominieren mit insgesamt 1.203.168 Einträgen (~87 %). Diesel-PHEV machen 175.043 Einträge (~13 %) aus. Der Anteil von Diesel-PHEV ist über die Jahre konstant niedrig.

Fahrzeuge können mehrfach in den Daten gemeldet worden sein. Es wurde daher hier stets jedes Fahrzeug (gemäß Variable „vehicleID“) nur einmal behalten, mit dem jeweils jüngsten Wert (d.h. wenn das gleiche Fahrzeug im Berichtsjahre 2021 und 2023 auftritt, wurde nur der Wert aus dem Jahr 2023 behalten. Damit ergibt sich die Anzahl eindeutiger Fahrzeuge zu $N = 981.139$.

Die Berechnung des energiebasierter Nutzungsanteils UF_{ener} sowie der Umrechnung zwischen Kraftstoffverbräuchen und Emissionen folgt direkt der Methodik in (European Commission 2024) sowie Gohlke & Gimbert (2025) und Suarez et al. (2025). Der Anteil von Kilometern im Charge-Depleting-Mode oder Anteil von Kilometern im Charge-Depleting-Mode mit Verbrennungsmotor aus werden direkt aus den OBFCM-Daten berechnet. Eine weitere Berechnung eines elektrischen Fahranteils (engl. *electric driving share* – EDS) folgt gemäß Anhang B in Plötz et al. (2022).

Wir verwenden weiterhin auch den energiebasierten Utility Factor (UF_{ener}) gemäß *Commission Staff Working Document SWD(2024) 59*. Dieser energiebasierte Utility Factor dient dazu, den Anteil der elektrischen Energie an der gesamten für den Fahrzeugantrieb genutzten Energie abzubilden. Im Gegensatz zum distanzbasierten Utility Factor, der auf dem Anteil der im Charge-Depleting-Mode zurückgelegten Kilometer beruht, berücksichtigt der energiebasierte Ansatz explizit die tatsächlich aus dem Stromnetz geladene elektrische Energie sowie die aus Kraftstoff bereitgestellte chemische Energie. Damit wird eine realitätsnähere Abbildung der elektrischen Nutzung ermöglicht, insbesondere in Situationen mit parallelem Betrieb von Elektromotor und Verbrennungsmotor. Der energiebasierte Utility Factor wird wie folgt definiert⁸:

$$UF_{\text{ener}} = \frac{E_{\text{grid,tot}} \cdot \eta_{\text{elec}} \cdot \eta_{\text{charging}}}{E_{\text{grid,tot}} \cdot \eta_{\text{charging}} \cdot \eta_{\text{elec}} + f_{\text{fuel,tot}} \cdot \rho_{\text{fuel}} \cdot LHV \cdot \eta_{\text{ICE}}}$$

⁸ Im Commission Staff Working Document SWD(2024) 59 fehlt fälschlicherweise die Ladeeffizienz in Zähler der Formel. Wir danken Jan Dornoff (ICCT) für diesen Hinweis und haben die Formel hier entsprechend korrigiert.

Dabei ist $E_{elec,tot}$ die gesamte elektrische Energie in Kilowattstunden (kWh), die im betrachteten Zeitraum aus dem Stromnetz in den Hochvoltspeicher des Fahrzeugs geladen wurde (OBFCM-Variable *grid_tot*), $\eta_{elec} = 85\%$ ist ein pauschaler elektrischer Wirkungsgrad für den elektrischen Antriebsstrang, $\eta_{charging} = 1/0,85$ die Ladeeffizienz, um von „Netzenergie in die Batterie“ zu „Gesamtnetzenergie“ zu gelangen, unter Berücksichtigung der Ladungsverluste, $fuel_{tot}$ die gesamte getankte Treibstoffmenge, ρ_{fuel} die Dichte des Kraftstoffs (0,7475 kg/l für Benzin und 0,8325 kg/l für Diesel), LHV der Heizwert des Kraftstoffs (41,5/3,6 kWh/kg für Benzin und 42,7/3,6 kWh/kg für Diesel) und η_{ICE} ein mittlerer Umwandlungswirkungsgrad der chemischen potentielle Energie im Kraftstoff in kinetische Energie (30,7 % für Benzin- und 36,9 % für Dieselantriebe).

Der energiebasierte Utility Factor gibt somit den Anteil der effektiv für den Antrieb genutzten elektrischen Energie an der gesamten Antriebsenergie an. Durch die explizite Berücksichtigung von mittleren Wirkungsgraden und Heizwerten stellt dieser Ansatz einen methodischen Unterschied gegenüber rein distanzbasierten Utility-Factor-Konzepten dar. Insbesondere erlaubt er eine konsistente Nutzung von OBFCM-Energiedaten. Allerdings kann er durch die Nutzung von Mittelwerten für Wirkungsgrade auf Ebene einzelner Fahrzeuge ungenau sein und eine Auswertung erscheint eher aggregiert auf Modellebene sinnvoll.

2.2. Methodik

Das Vorgehen gliedert sich in vier Arbeitspakete.

AP1: Bewertung der VDA-Forderungen zur PHEV-Regulierung

Zielsetzung: Systematische Analyse und Bewertung der VDA-Forderungen zur Aussetzung der Utility-Factor-Anpassungen sowie zu Maßnahmen wie Geofencing und Inducement hinsichtlich ihrer technischen Machbarkeit und realistischen CO₂-Minderungswirkung.

Im ersten Arbeitspaket erfolgt eine systematische Analyse der Forderungen des Verbands der Automobilindustrie zur Aussetzung der geplanten Anpassungen des Utility Factors sowie zu zusätzlichen Maßnahmen wie Geofencing und Inducement. Ziel ist eine technische und emissionsbezogene Bewertung dieser Vorschläge unter Berücksichtigung ihrer realistischen Wirksamkeit im Hinblick auf CO₂-Reduktion. Methodisch werden zunächst Wirkungsszenarien entwickelt, die auf einer Modellierung der elektrischen Fahranteile basieren. Grundlage hierfür bilden die verfügbaren OBFCM-Messdaten, ergänzt um eigene Ableitungen zur Sensitivität der Nutzungsanteile gegenüber verschiedenen regulatorischen Eingriffen. Anschließend werden die Vorschläge des VDA hinsichtlich ihrer Umsetzbarkeit, Überwachbarkeit und möglicher Zielkonflikte bewertet. Dies umfasst eine differenzierte Analyse der technischen Reife und der regulatorischen Durchsetzbarkeit von Geofencing- und Inducement-Ansätzen sowie deren potenzieller Beitrag zu einer verlässlichen CO₂-Minderung. Die Gesamtbewertung erfolgt entlang eines strukturierten Kriterienrasters, das Vor- und Nachteile sowie zu erwartende Auswirkungen zusammenführt.

AP2: Vertiefte empirische Analysen der OBFCM-Realemissionsdaten

Zielsetzung: Erweiterte statistische Auswertung der EEA-OBFCM-Daten zur Ableitung aktualisierter Utility-Factor-Kurven und Identifikation von Best-Practice-Fahrzeugen und Nutzungsmustern mit niedrigen Realemissionen.

Das zweite Arbeitspaket widmet sich einer umfassenden statistischen Auswertung der OBFCM-Daten des Europäischen Umweltamts, mit dem Ziel, aktualisierte Utility-Factor-Kurven zu erzeugen und Best-Practice-Fahrzeuge mit niedrigen realen CO₂-Emissionen zu identifizieren. Dabei werden unterschiedliche Definitionen des Utility Factors untersucht. Diese umfassen den Anteil der gefahrenen

Kilometer im gesamten CD-Modus, den Anteil rein elektrisch betriebener CD-Kilometer (engine-off), energiebasierte Varianten sowie Quotienten aus den gemessenen Realemissionen und den berechneten hypothetischen Emissionen bei ausschließlicher Nutzung des CS-Modus. Für jede dieser Definitionen wird bewertet, inwieweit sie die tatsächliche emissionsrelevante Nutzung von PHEV abbildet und damit für die Typgenehmigung und Regulierung relevante „real world representativeness“ bietet. Auf Basis der Ergebnisse werden Fahrzeuge mit besonders hohen elektrischen Fahranteilen identifiziert. Darüber hinaus werden, sofern notwendig, erweiterte Regressionsmodelle entwickelt, beispielsweise zur besseren Abbildung nichtlinearer Zusammenhänge zwischen elektrischer Reichweite, Nutzerverhalten und Utility Factor.

AP3: Entwicklung eigener regulatorischer Anforderungen für Low-Emission-PHEV

Zielsetzung: Entwicklung eines konsistenten Regulierungsrahmens für PHEV, der reale CO₂-Reduktion sicherstellt und industriepolitische mit umweltpolitischen Zielen vereinbart.

Arbeitspaket 3 konzentriert sich auf die Entwicklung eines konsistenten, zukunftsfähigen Regulierungskonzepts für Plug-in-Hybride, das sowohl reale CO₂-Reduktionen sicherstellt als auch industriepolitische und umweltpolitische Ziele miteinander in Einklang bringt. Zunächst werden technische Mindestanforderungen definiert, unter anderem hinsichtlich elektrischer Reichweiten, zulässiger Real-World-CO₂-Emissionen und der Implementierung einer Electric-first-Fahrlogik, die den Verbrennungseinsatz minimiert. Diese Anforderungen beziehen explizit auch Range-Extender-Konfigurationen ein. Anschließend werden verhaltensbasierte Anforderungen ausgearbeitet, darunter Nachweissysteme zur Ladefrequenz, Mindest-Utility-Factors sowie Anforderungen an die OBFCM-basierte Compliance. Ergänzend werden mögliche regulatorische Mechanismen skizziert, die ein wirksames Zusammenspiel aus Anreizen und Durchsetzung ermöglichen, beispielsweise Marktanteilsbegrenzungen, zeitliche Befristungen für Übergangsregeln sowie bonus- und sanktionsbasierte Elemente.

AP4: Szenario-Modellierung der CO₂-Emissionswirkungen

Zielsetzung: Quantitative Bewertung der Klimawirkungen verschiedener Regulierungsoptionen für Deutschland und EU27 bis 2035/2040 mit Darstellung als Flottenziel-Äquivalente für die politische Kommunikation.

Im vierten Arbeitspaket erfolgt eine quantitative Abschätzung der Klimawirkungen unterschiedlicher Regulierungsoptionen für Deutschland und die EU27 bis 2035 und 2040. Hierzu wird ein Szenariensatz entwickelt, die verschiedenen Entwicklungen der Utility-Factor-Regulierung sowie zusätzliche PHEV-Anforderungen abbildet. Modellierung folgender Szenarien:

- **Referenz-Entwicklung:** Umsetzung UF-Updates ($d_n=2200$ km ab 2025, $d_n=4260$ km 2027)
- **Option 1a:** Aussetzung UF-Updates 2025 & 2027
- **Option 1b:** Option 1a + VDA-Maßnahmen (Geofencing, Inducement)
- **Option 2:** Aussetzung nur UF-Update 2027

Neben einem Referenzszenario, das die Umsetzung der geplanten UF-Updates (2025 $d=2200$ km, 2027 $d=4260$ km) abbildet, werden Szenarien betrachtet, die eine vollständige oder teilweise Aussetzung dieser Anpassungen beinhalten sowie Kombinationen aus regulatorischer Aussetzung und VDA-Forderungen wie Geofencing und Inducement. Ein weiteres Szenario integriert mögliche bonifizierte Low-Emission-PHEV, die aus Arbeitspaket 3 hervorgehen. Für jedes Szenario werden die jährlichen CO₂-Emissionen der Flotte für Deutschland berechnet und in CO₂-Äquivalente für die

europäische Flottenregulierung überführt. Die Darstellung der Ergebnisse folgt nicht der Reihenfolge der Arbeitspakete, sondern einem logischeren Ablauf.

3. Ergebnisse

3.1. Empirische Analysen der OBFCM-Realemissionsdaten

Die OBFCM-Daten erlauben umfangreiche Auswertungen zur realen Nutzung von knapp einer Million PHEV in Europa. Im Folgenden werden die Auswertungen in mehreren Schritten vorgestellt.

3.1.1. Deskriptive Statistik

Abbildung 8 zeigt die normierte Häufigkeitsverteilungen von Verbräuche im CS-, CD- und gemischten Betrieb sowie die Anteile der km im CD-Mode, im CD-Mode mit Verbrenner aus und Anteil der elektrischen Fahrenergie (Mittelwerte als vertikale rote Linien).

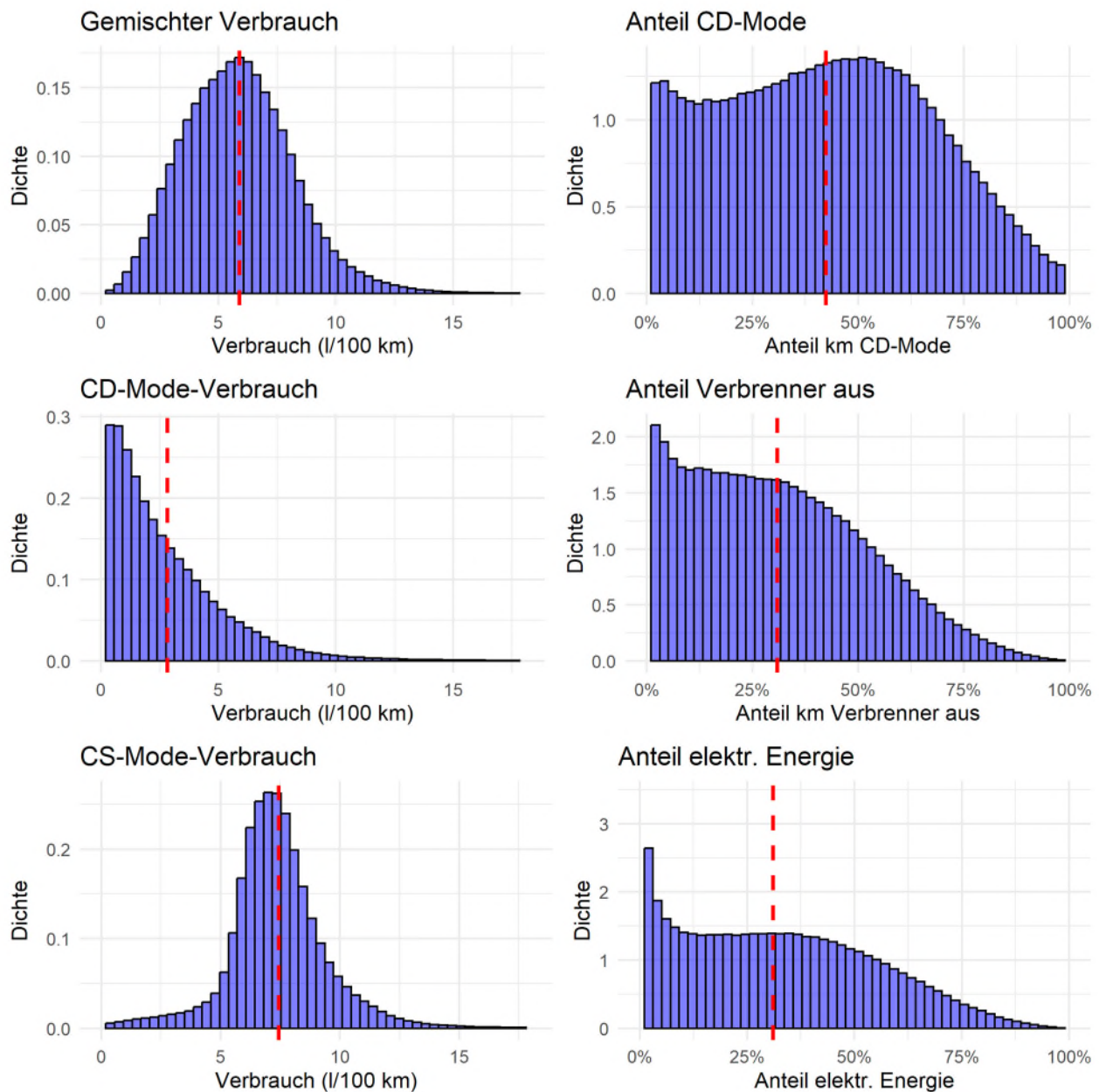


Abbildung 8: Relative Häufigkeitsverteilung der wichtigsten Beobachtungsgrößen

Quelle: Eigene Berechnungen

In den Verteilungen zeigt sich, dass der gemischte und der CS-mode-Verbrauch einen klaren Peak hat, während der CD-Mode deutlich rechtsschief verteilt ist, d.h. vor allem viele geringe Werte aber auch einige rechts hohe. Beim Anteil der km im CD-Mode ist die Verteilung eher breit mit einem leichten Peak um 50 % ab einem Mittelwert von ca. 42 %. Der Anteil km im CD-Mode mit Verbrennungsmotor aus und der Anteil der elektrischen Energie am Energieverbrauch sind relativ flache leicht rechtsschiefe Verteilungen von 0 – 50 % und bei über 50 % dann stark abfallend. Die Mittelwerte sind mit 30,9 % und 24,7 % entsprechend geringer.

Mittelwerte, Mediane und Gesamt-km-gewichtete Mittelwerte der sechs Messgrößen sind in folgender Tabelle gezeigt.

Tabelle 3: Zentrale Kenngrößen Realverbrauch PHEV

Messgröße	Median	Mittelwert	km-gewichteter Mittelwert	N
Gemischter WLTP-Verbrauch in l/100 km	1,40	1,53	1,57	981.035
Gemischter WLTP-Verbrauch in gCO₂/km	32,0	35,3	36,5	981.035
Gemischter Verbrauch in l/100 km	5,76	5,89	6,12	981.035
Abweichung real zu nominal Verbrauch*	281 %	323 %	326 %	981.035
CD-Mode-Verbrauch in l/100 km	2,07	2,82	2,98	979.639
CS-Mode-Verbrauch in l/100 km	7,27	7,44	7,40	966.392
Anteil CD-mode-km UF_{CD}	42,3 %	42,4 %	39,0 %	981.035
Anteil CD-Mode-km mit Verbrenner aus UF_{real}	28,7 %	30,9 %	27,4 %	981.035
Anteil elektrischer Energie UF_{ener}	29,1 %	31,0 %	31,0 %	972.200

Quelle: Eigene Berechnungen. * Berechnet als Realverbrauch / Nominalverbrauch – 1

Der mittlere gemischte Verbrauch liegt bei 5,8 – 6,1 l/100 km und der CS-Mode-Verbrauch bei 7,3–7,4 l/100 km. Auffällig ist auch der mittlere CD-Mode-Verbrauch mit 2,1 l/100 km im Median, 2,8 l/100 km im Mittel und knapp 3 l/100 km im km-gewichteten Mittel. Die Werte der versch. UF stimmen damit bis auf ca. ein Prozentpunkt Abweichung mit den Ergebnissen der Europäischen Kommission zu den Daten nur von 2021 überein (EC 2024).

Weiterhin fällt auf, dass nicht nur die mittleren realen Verbrauchswerte deutlich über den gemischten WLTP-Verbräuchen von 1,4 – 1,6 l/100 km liegen, sondern selbst die CD-Mode-Verbräuche deutlich darüber. Die gemischten Realverbräuche sind ca. 300 % über den gemischten WLTP-Werten und CD-Mode-Werte sind im Mittel 93 % (99 % im km-gewichteten Mittel) und im Median 44 % über den CD-Mode-Werten der Typgenehmigung (nicht gezeigt in Tabelle).

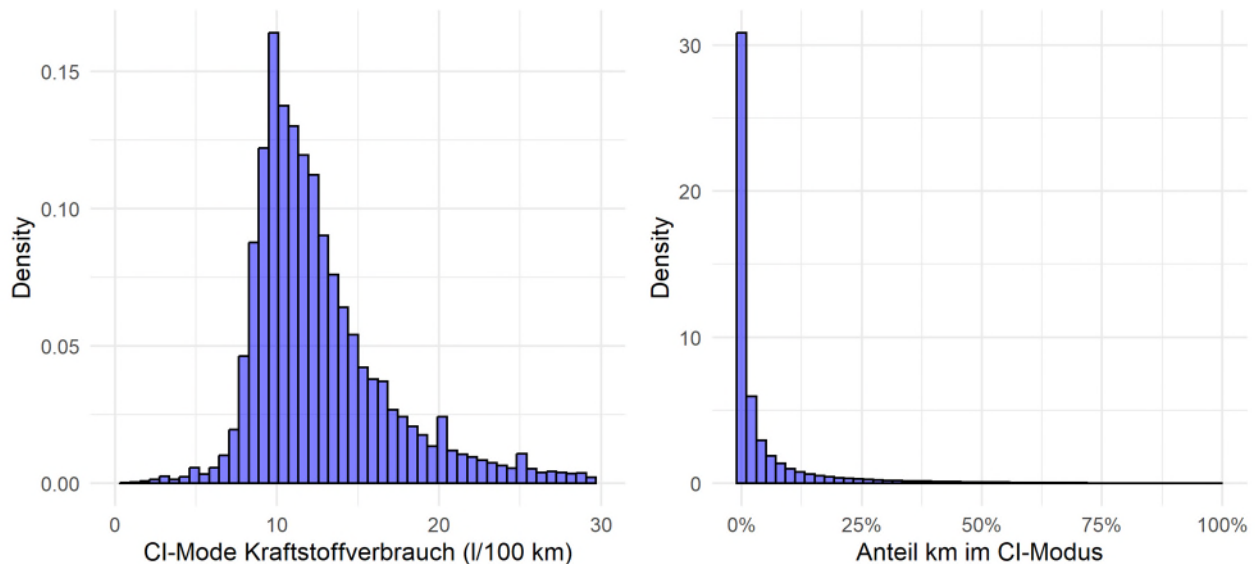


Abbildung 9: Häufigkeitsverteilung Kraftstoffverbrauch und Anteil-km im CI-Modus.

Quelle: Eigene Berechnungen

Abbildung 9 zeigt die empirischen Verteilungen zweier weitere Kenngrößen des realen PHEV-Betriebs. Links ist die Dichteverteilung des Kraftstoffverbrauchs im Charge-Increasing (CI)-Mode dargestellt. Sie weist ein klares Maximum im Bereich von etwa 9 bis 12 l/100 km auf und ist rechtsschief, was auf eine relevante Streuung mit einzelnen Fahrzeugen und Fahrprofilen mit deutlich höheren Verbräuchen bis über 20 l/100 km hinweist. Dies verdeutlicht, dass der CI-Mode im Realbetrieb mit hohen spezifischen Kraftstoffverbräuchen einhergeht, da der Verbrennungsmotor neben dem Vortrieb auch zum Laden der Batterie genutzt wird. Rechts ist die Verteilung des Anteils der im CI-Mode zurückgelegten Kilometer dargestellt. Diese ist stark auf kleine Werte konzentriert und fällt rasch ab, was zeigt, dass der CI-Mode zwar nur einen geringen Anteil der Gesamtfahrleistung ausmacht, aber dennoch energetisch und emissionsseitig relevant ist. Zusammen unterstreichen beide Darstellungen, dass seltene, aber verbrauchsintensive CI-Phasen auch einen Einfluss auf die realen CO₂-Emissionen von PHEV haben.

Abbildung 10 zeigt die Häufigkeitsverteilung der aus dem Stromnetz geladene Strommenge (nicht die verbrauchte, sondern geladene) pro 100 km Fahrstrecke. Die Normierung auf die Fahrstrecke erfolgt, um Fahrzeuge mit hoher und geringer Gesamtfahrleistung vergleichbar zu machen. Die Auswertung zeigt, dass die verschiedenen Marken und Modell sehr unterschiedliche Menge an Strom laden. Typischerweise werden zwischen 5 und 10 kWh pro 100 km Fahrstrecke geladen, bei einigen Marken und Fahrzeugen aber auch deutlich weniger oder deutlich mehr. Auffällig ist weiterhin bei allen Marken der Peak nahe Null. Dies sind PHEV, die so gut wie nie geladen werden. Besonders auffällig in diesem Kontext ist Porsche: Es sind 11307 PHEV in der Datenbasis, die zum Zeitpunkt der Datenübermittlung in Ihrem Fahrzeugleben 27.000 km im Mittel gefahren sind, aber in Summe im Mittel nur 7 kWh geladen haben.

Histogram of charged electricity per distance driven by Make

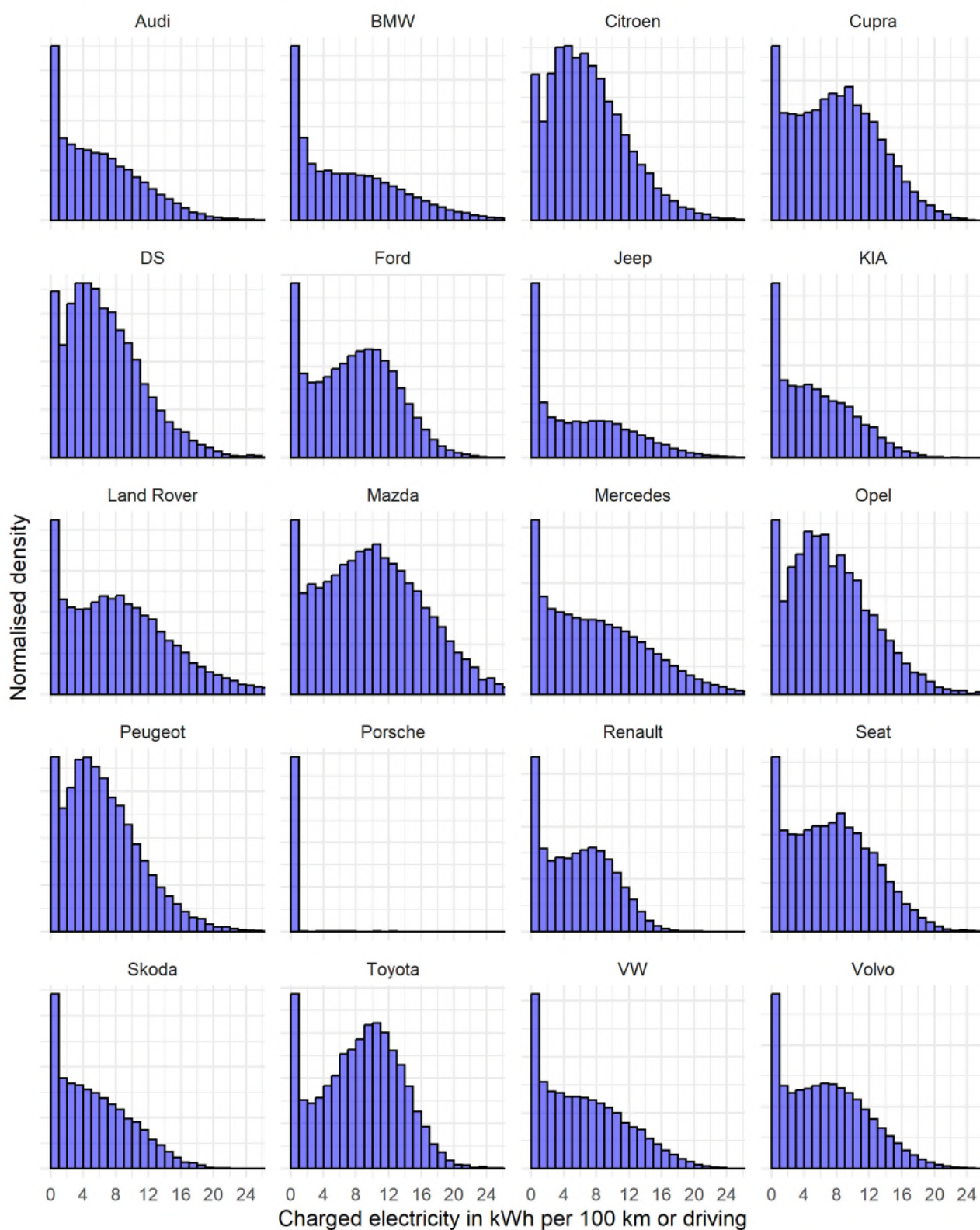


Abbildung 10: Relative Häufigkeitsverteilung des geladenen Stromes in kWh pro 100 km Fahrdistanz.

Quelle: Eigene Berechnungen

3.1.2. Zusammenhänge

Neben den Verteilungen und Mittelwerten sind auch Zusammenhänge zwischen zentralen Größen für das Verständnis der Realnutzung und Energieverbräuche von PHEV interessant.

Die umfangreichen Realnutzungsdaten ermöglichen eine empirische Prüfung des Zusammenhanges zwischen Ladehäufigkeit und Kraftstoffverbrauch von PHEV. Abbildung 11 zeigt, dass der mittlere Kraftstoffverbrauch zwar mit dem Anteil im CD-Mode und damit mit der Ladehäufigkeit sinkt, aber maximal auf den CD-Mode-Verbrauch von 2,8 l/100 km. D.h. aktuelle PHEV verbrauchen im Flottenmittel nie weniger als 2,8 l/100 km bzw. 64 gCO₂/km, unabhängig davon wie oft sie geladen werden. Es zeigt sich weiterhin, dass der mittlere Anteil von km mit Verbrennungsmotor aus bei 25 – 31 % liegt (vgl. UF_{ener} und UF_{real}). Allerdings ist der Kraftstoffverbrauch im CD-Mode unabhängig von der Ladehäufigkeit bei ca. 2,8 l/100 km. Das heißt auch häufiges Laden führt zwar zu höheren elektrischen Fahranteilen, ändert aber den CD-Mode-Verbrauch nicht.

Abbildung 12 zeigt, dass es im Flottenmittel keinen relevanten Zusammenhang zwischen CD-Mode-Verbrauch und dem Anteil der CD-Mode-km gibt. D.h. Fahrzeuge, die sehr viel geladen werden und damit hohe CD-Mode-Anteile von bspw. über 80 % aufweisen, haben einen ähnlich hohen CD-Mode-Verbrauch von ca. 2,7 l/100 km wie Fahrzeuge, die sehr selten geladen werden und daher wenig, bspw. unter 30 % in CD-Mode fahren. Hier wäre auch denkbar gewesen, dass bei hoher Ladehäufigkeit öfter der Verbrennungsmotor ausbleibt und mehr elektrisch gefahren wird, aber im mittleren CD-Mode-Verbrauch ist davon im Flottenmittel nichts zu erkennen. Hierbei ist zu beachten, dass der Verbrauch im CD-Mode insgesamt gezeigt ist und nicht nur im CD-Mode mit Verbrennungsmotor aus.

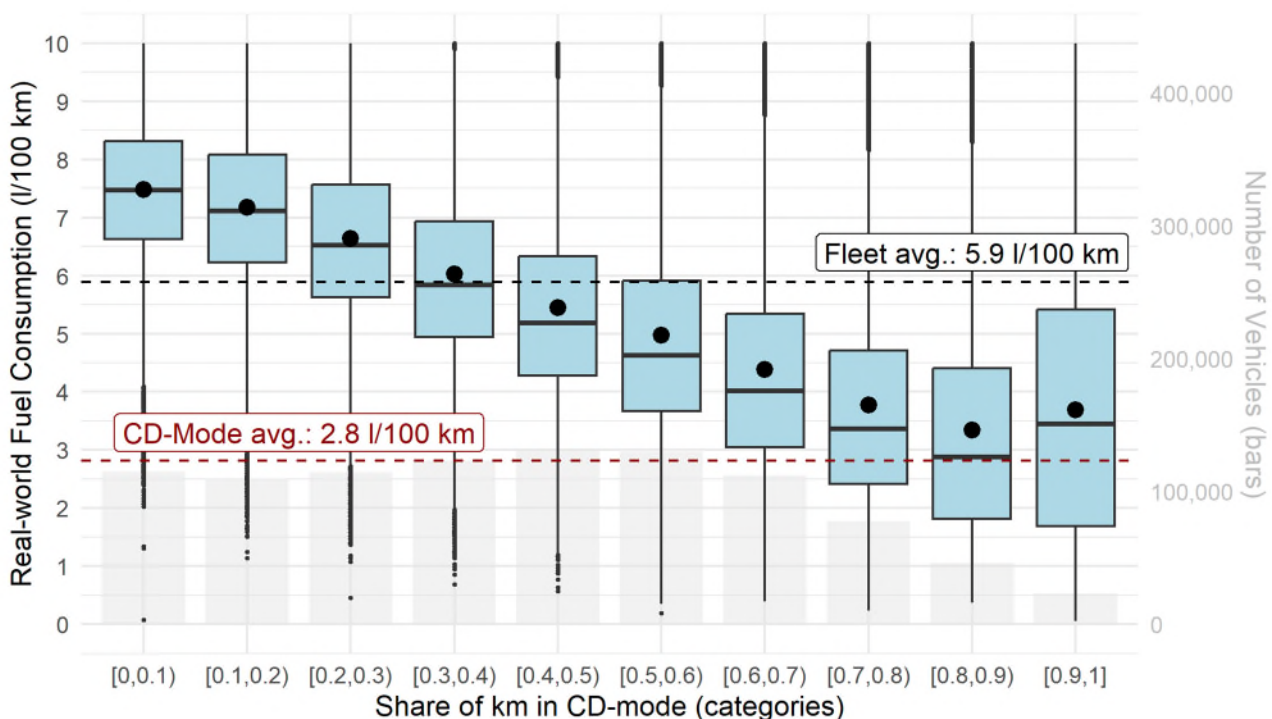


Abbildung 11: Realverbrauch in Abhängigkeit des CD-Mode-Anteils.

Quelle: Eigene Berechnungen

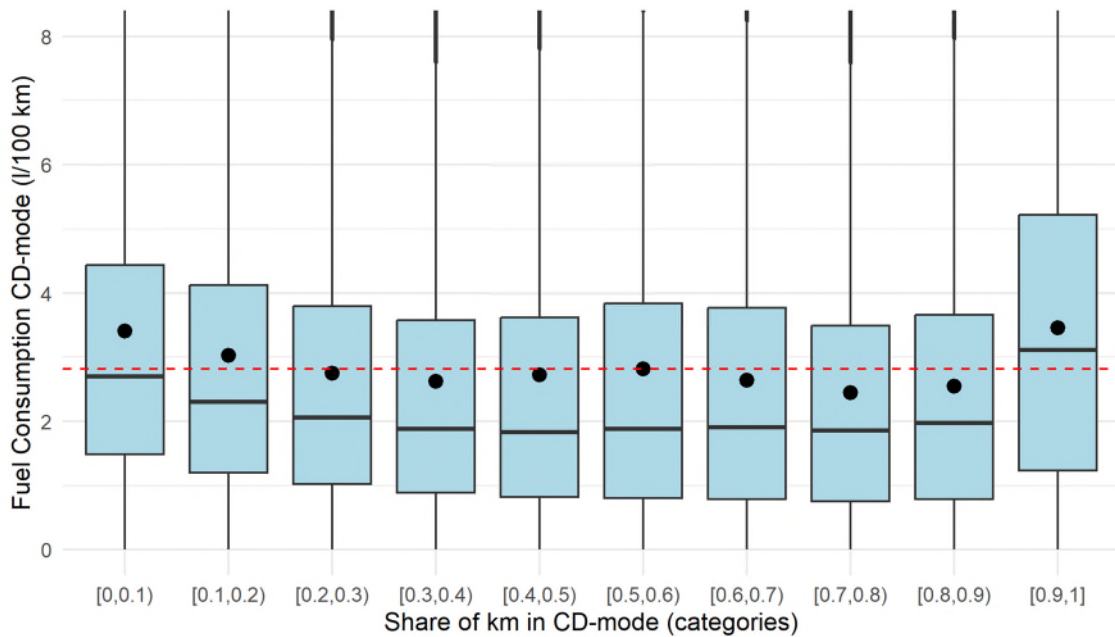


Abbildung 12: Zusammenhang zwischen CD-Mode-Verbrauch und Anteil CD-Mode-km (Flottenmittel 2,8 L/100 km als horizontale gestrichelte Linie)

Quelle: Eigene Berechnungen

Einige offensichtliche Zusammenhänge werden auch in den Realdaten deutlich. Abbildung 13 zeigt, dass der Anteil Kilometer mit Verbrenner aus mit der Ladehäufigkeit gemessen über Anteil CD-Mode-km steigt. Der Zusammenhang ist sehr deutlich, aber gleichzeitig ist zu beachten, dass der rein elektrische Fahranteil (hier als UF_{real} , der Anteil km CD-Mode mit Verbrenner aus) im Flottenmittel selbst bei sehr häufigem Laden (Anteil CD-Mode-km >80%) nie größer als 65 % ist, d.h. trotz häufigem Laden ist im Mittel bei einem Drittel der km der Verbrennungsmotor an.

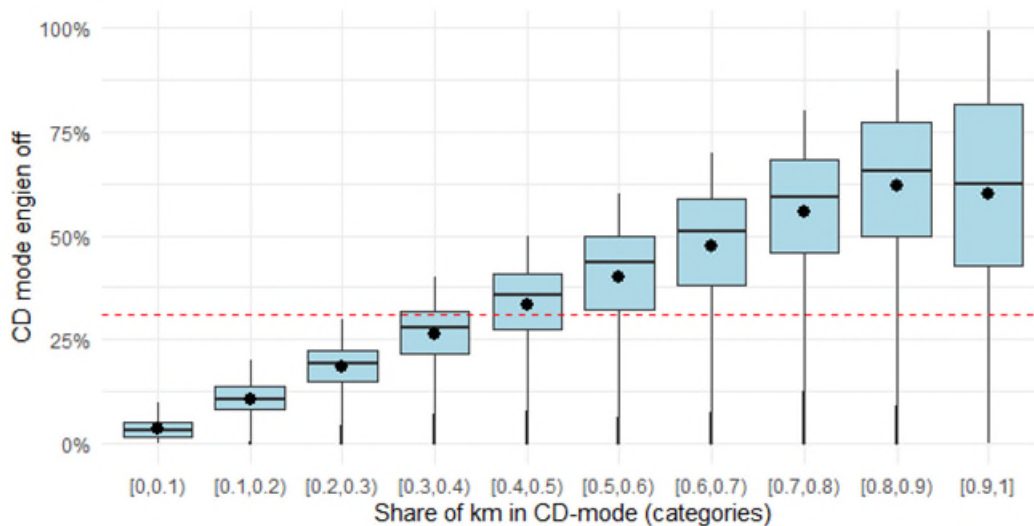


Abbildung 13: Zusammenhang zwischen Anteil CD-Mode-km mit Verbrennungsmotor aus und Anteil CD-Mode-km

Quelle: Eigene Berechnungen

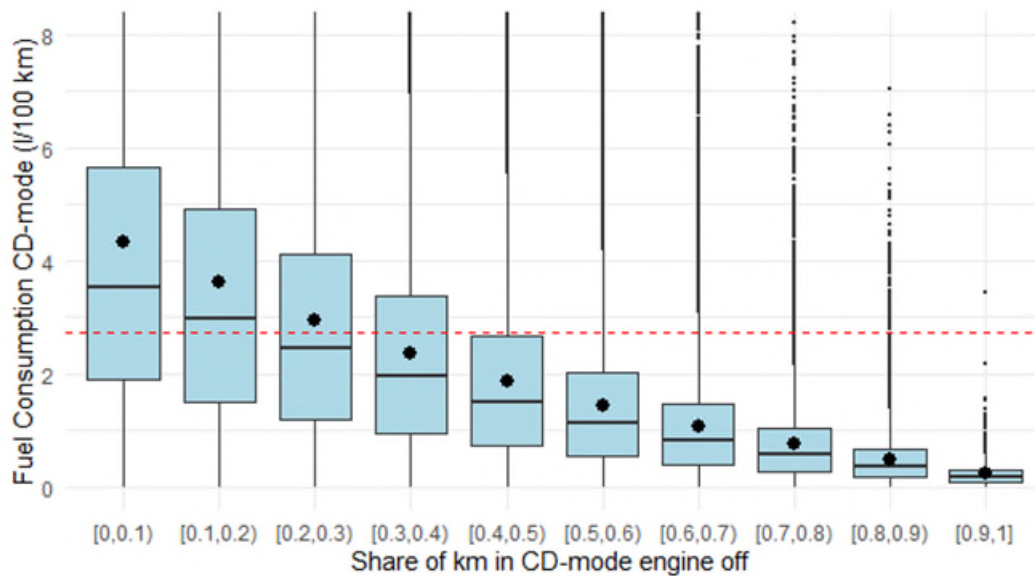


Abbildung 14: Zusammenhang zwischen CD-Mode-Verbrauch und Anteil CD-Mode-km mit Verbrennungsmotor aus

Quelle: Eigene Berechnungen

Ebenso zeigt Abbildung 14, dass es mehr elektrisches Fahren zu weniger Verbrauch im CD-Mode führt. Da das elektrische Fahren Teil der CD-Mode ist, führen hohe elektrische Fahranteile zu geringen CD-Mode-Verbräuchen. Aber CD-Mode ist eben nicht gleichzusetzen mit elektrischem Fahren.

Allerdings gibt es in den Zusammenhängen teils erhebliche Unterschiede zwischen den Herstellern vmtl. größtenteils aufgrund unterschiedlicher PHEV-Betriebsstrategien der Hersteller (Kundenspezifisches Ladeverhalten ist ja über den CD-Mode-Anteil auf der x-Achse explizit abgebildet) – vgl. Abbildung 15. Der Gesamt Flottenmittelwert von 2,8 l/100 km ist als horizontale gestrichelte Linie dargestellt.

Einige Marken wie Ford, Kia, Toyota oder Renault zeigen eine deutlich fallenden CD-Mode-Verbrauch mit zunehmendem Anteil von CD-Mode-km oder auch insgesamt geringe CD-Mode-Verbräuche durch eine überwiegend elektrische Betriebsführung (besonders Toyota und Renault). Bei anderen Marken wie Ford, Audi, BMW, Cooper oder Seat ist der Zusammenhang sehr schwach und der CD-Mode-Verbrauch ist fast unabhängig vom CD-Mode-Anteil. Die Mittelwerte von CD-Mode- und CS-Mode-Verbrauch nach Marke sind in Abbildung 16 dargestellt. Einige Marken wie Toyota, Renault oder Kia erreichen sowohl geringer CS-Mode-Verbräuche als auch geringe CD-Mode-Verbräuche. Insgesamt ist die Streuung in den Verbrauchsmittelwerten zwischen den Marken groß.

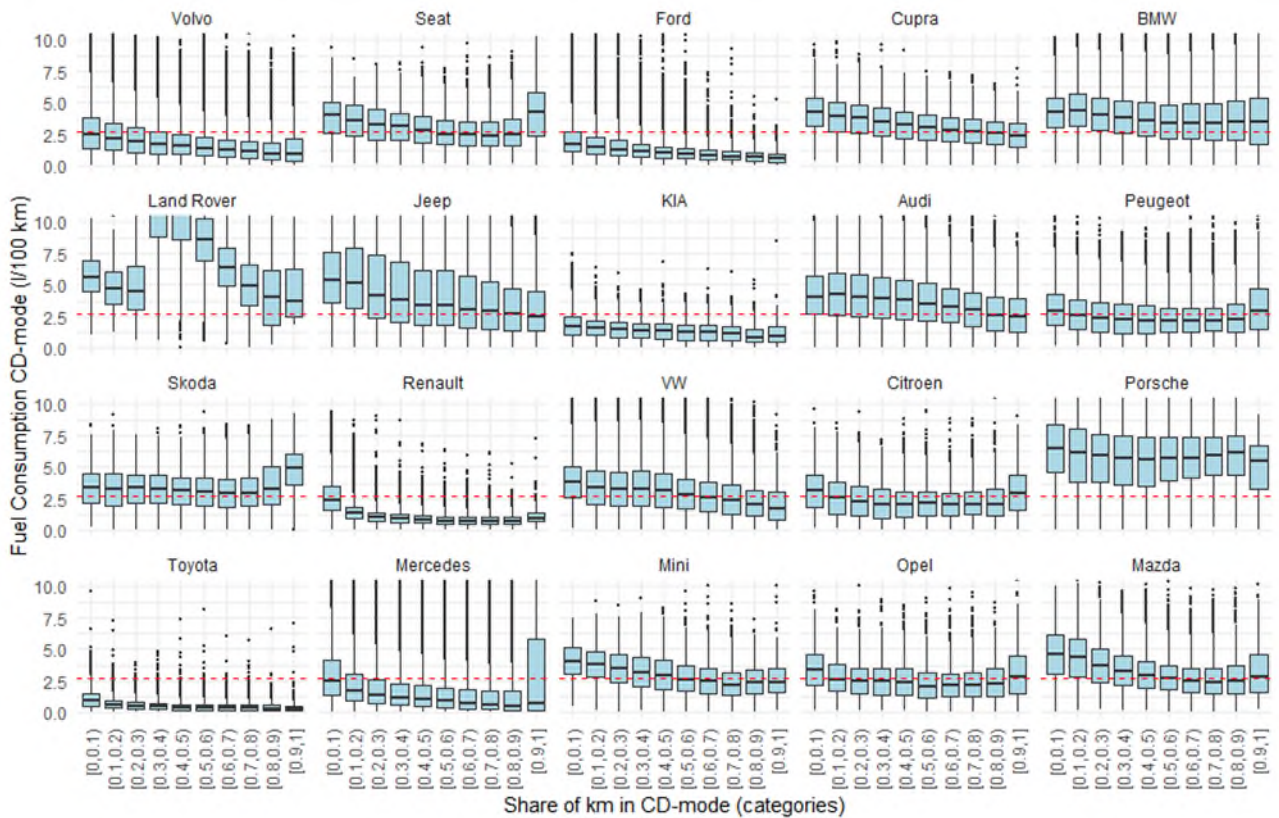


Abbildung 15: Zusammenhang zwischen CD-Mode-Verbrauch und Anteil CD-Mode-km nach Marke (Flottenmittel 2,8 L/100 km als horizontale gestrichelte Linie)

Quelle: Eigene Berechnungen

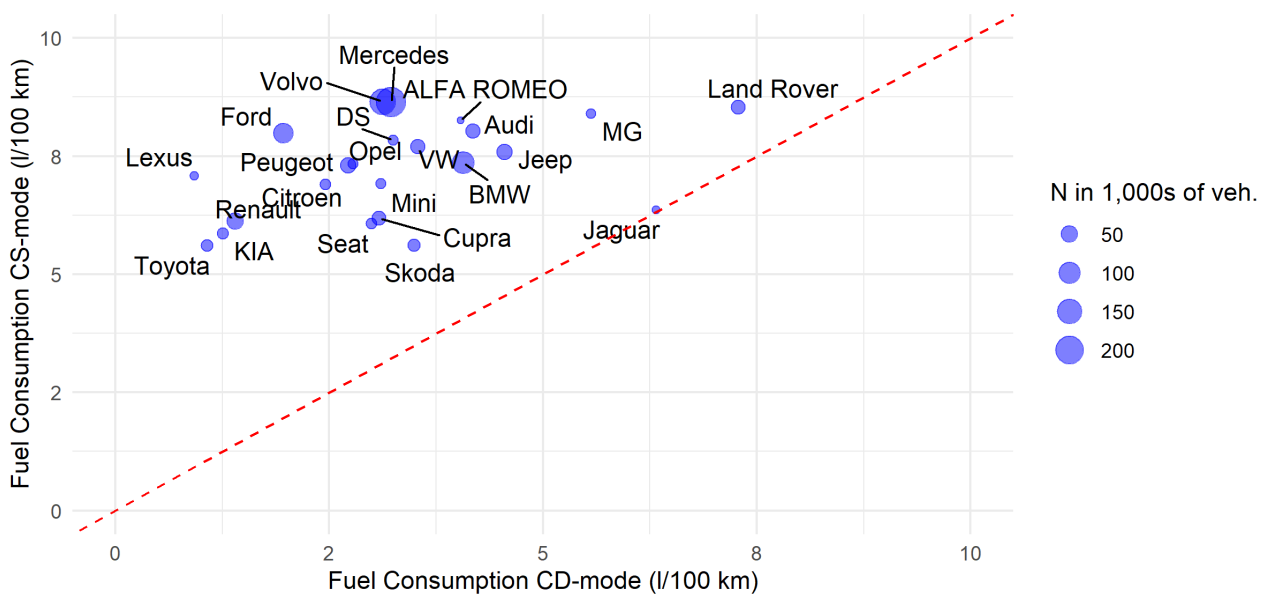


Abbildung 16: Mittlere Realverbräuche CD- und CS-Mode nach Marken (bei >1000 Fahrzeugen)

Quelle: Eigene Berechnungen

3.2. Empirische Utility-Faktor-Kurven

3.2.1. Einleitung und Definitionen

Auf Basis der OBCFM-Daten für PHEV werden in diesem Abschnitt empirische UF-Kurven bestimmt und berechnet, wie der UF sein müsste, um die Lücke zwischen realen und nominalen Verbräuchen auf die Lücke wie bei Verbrenner-Pkw zu reduzieren. Derzeit gibt es vier Definitionen von UF, die in Tabelle 4 dargestellt sind.

Tabelle 4: Utility-Faktor-Definitionen

Ansatz	Zweck	Abk.	Definition	Quelle
Anteil CD-Mode	Entspricht Regulierung	UF _{CD}	$UF_{CD} = \frac{dist_{CD}}{dist_{tot}}$	OBFCM-Daten
Anteil CD-Mode Verbrenner aus	Elektrischer Fahranteil	UF _{real}	$UF_{real} = \frac{dist_{CD, engine-off}}{dist_{tot}}$	OBFCM-Daten
Realverbrauchs-basiert	Elektrischer Fahranteil	UF _{EDS}	$UF_{EDS} = 1 - \frac{FC_{tot}^{real}}{FC_{CS}^{real}}$	OBFCM-Daten & Plötz et al. (2022)
Energiebasiert	Elektrischer Fahranteil	UF _{ener}	$UF_{ener} = \frac{E_{grid,tot} \cdot \eta_{elec} \cdot \eta_{charging}}{E_{grid,tot} \eta_{charging} \eta_{elec} + fuel_{tot} \rho_{fuel} LHV \eta_{ICE}}$	Nach EC (2024)

Quelle: Eigene Darstellung

Die ersten drei Definitionen können direkt mit den OBFCM-Daten berechnet werden und der Energiebasierte Ansatz erfordert einige Zusatzannahmen (siehe auch Kapitel 2.1). Darüber hinaus stellen wir hier eine neue UF-Berechnung vor, bei der die UF so festgelegt wird, dass eine bestimmte Lücke zwischen dem tatsächlichen und dem typgenehmigten Kraftstoffverbrauch erzielt wird, in diesem Fall 20 %. Im Folgenden werden alle UF für jedes Fahrzeug berechnet und auch auf Modell-ebene aggregiert. Die Werte werden miteinander verglichen und auch mit der Regulierung verglichen.

3.2.2. Zusammenhänge zwischen den UF

Abbildung 17 zeigt den Zusammenhang zwischen dem CD-Mode-Anteil mit abgeschaltetem Verbrennungsmotor auf der x-Achse und dem energie-basierten Utility Factor (UF_{ener}) auf der y-Achse. Jeder Punkt repräsentiert ein einzelnes der 1436 Fahrzeugmodelle aus den OBFCM-Daten, auf die sich die knapp eine Million PHEV verteilen. Man erkennt wie erwartet einen positiven, annähernd linearen Zusammen zwischen beiden UF-Definitionen. Fahrzeuge mit höheren Anteilen an CD-Mode-Kilometern bei abgeschaltetem Verbrennungsmotor weisen im Mittel auch höhere energiebasierte elektrische Fahranteile auf. Die schwarze Regressionslinie mit grauem Konfidenzband quantifiziert diesen Zusammenhang und verdeutlicht, dass der UF_{ener} systematisch mit dem CD-Mode-engine-off-Anteil zunimmt. Gleichzeitig ist die Streuung allerdings beträchtlich, insbesondere im Bereich zwischen etwa 10 und 40 Prozent CD-Mode-Anteil, was auf unterschiedliche elektrische Energieverbräuche sowie variierende Fahrprofile hinweist. Die rot gestrichelte Diagonale entspricht der 1:1-Linie, bei der der energiebasierte elektrische Anteil exakt dem CD-Mode-engine-off-Anteil entsprechen würde. Die überwiegende Mehrzahl der Beobachtungen liegt unterhalb dieser Linie. Dies zeigt, dass ein gegebener Anteil an CD-Mode-Kilometern typischerweise zu einem geringeren energiebasierten elektrischen Anteil führt. Insgesamt illustriert die Abbildung, dass der CD-Mode-engine-off-Anteil zwar ein geeigneter Proxy für elektrisches Fahren ist, auf Fahrzeug- und Modellebene aber

doch stark abweichen kann und systematisch kleiner ist als der energetisch abgeleitete UF. Dies unterstreicht die konzeptionellen Unterschiede zwischen distanz-basierten und energie-basierten Utility-Factor-Definitionen. Die Auswertung auf Modellebene zeigt weiterhin, dass ein relevanter Anteil der PHEV überhaupt keinen energetischen elektrischen Fahranteil nach Energie UF_{ener} aufweist. Von insgesamt 1436 Modellen in der Stichprobe weisen 101 einen $UF_{\text{ener}} = 0$ auf (7 % der Modelle, 0,4 % der Fahrzeuge).

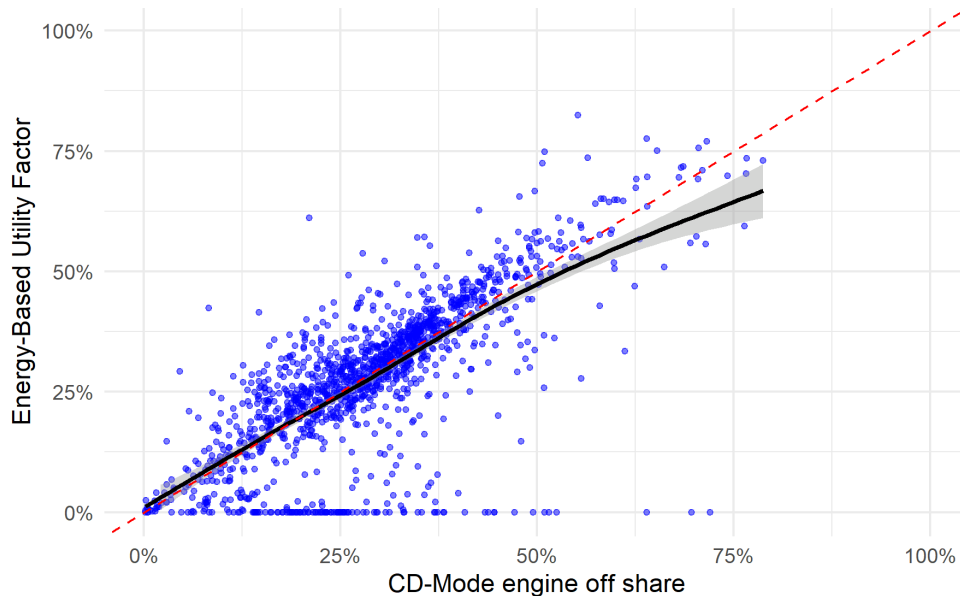


Abbildung 17: Zusammenhang zwischen Anteil km im CD-Mode mit Verbrenner aus UF_{real} und Energie-basiertem UF_{ener}

Quelle: Eigene Berechnungen. Gezeigt sind Mittelwerte auf Modellebene (blaue Punkte) sowie lokaler Erwartungswert (schwarz)

Abbildung 18 zeigt weiterhin den Zusammenhang zwischen dem CD-Mode-Anteil gemäß Utility-Factor-Definition (UF_{CD}) auf der x-Achse und dem Anteil der CD-Mode-Kilometer mit abgeschaltetem Verbrennungsmotor UF_{real} . Es besteht eine klare positive Korrelation, jedoch mit systematischer Abweichung von der 1:1-Linie (rot gestrichelt). Die Regressionslinie liegt über den gesamten Wertebereich hinweg deutlich unterhalb der Diagonalen, was darauf hinweist, dass ein hoher UF_{CD} nicht gleichbedeutend mit einem entsprechend hohen Anteil rein elektrischer CD-Mode-Kilometer ist. Insbesondere bei höheren UF_{CD} -Werten nimmt die Streuung stark zu, und viele Fahrzeuge weisen trotz hoher CD-Mode-Anteile substanzielle Verbrennernutzung innerhalb des CD-Modes auf. Die Abbildung unterstreicht, dass UF_{CD} die elektrische Nutzung systematisch und erheblich überschätzt und dass die Unterscheidung zwischen CD-Mode insgesamt und elektrischem Fahranteil für PHEV zentral ist.

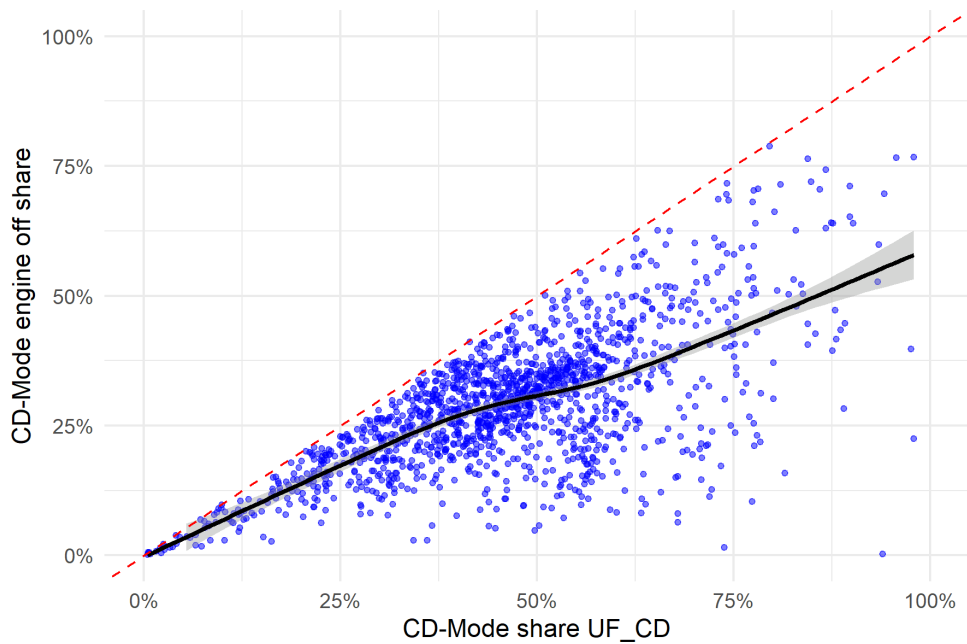


Abbildung 18: Zusammenhang zwischen Anteil km im CD-Mode mit Verbrenner aus UF_{real} (y-Achse) und Anteil-km im CD-Mode UF_{CD}

Quelle: Eigene Berechnungen. Gezeigt sind Mittelwerte auf Modellebene (blaue Punkte) sowie lokaler Erwartungswert (schwarz)

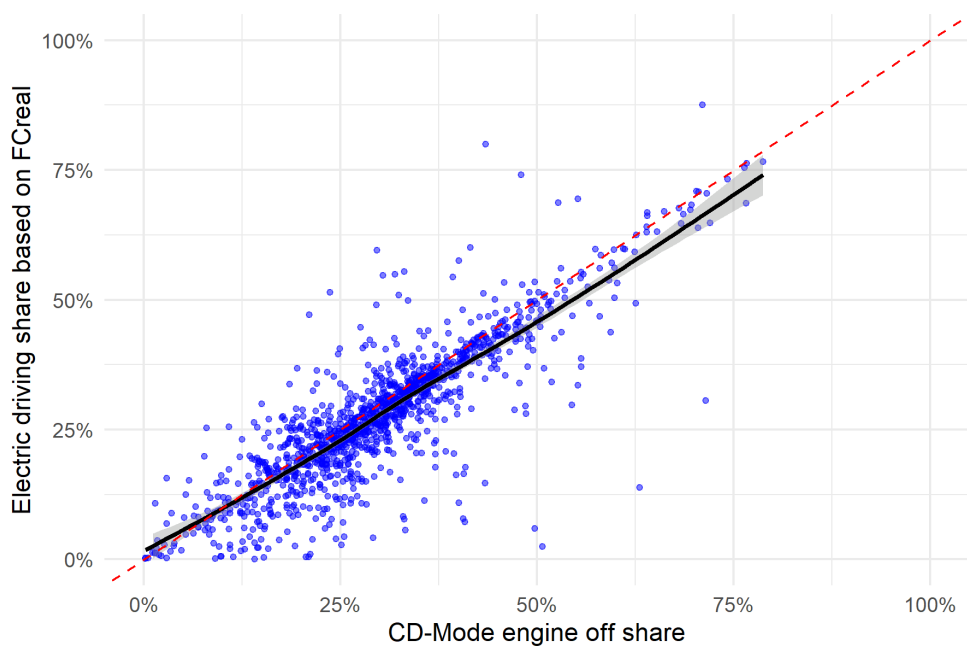


Abbildung 19: Zusammenhang zwischen Anteil km im CD-Mode mit Verbrenner aus UF_{real} (x-Achse) und elektrische Fahranteil UF_{EDS} nach Plötz et al. (2022).

Quelle: Eigene Berechnungen. Gezeigt sind Mittelwerte auf Modellebene (blaue Punkte) sowie lokaler Erwartungswert (schwarz)

Abbildung 19 zeigt den Zusammenhang zwischen Anteil km im CD-Mode mit Verbrenner aus UF_{real} und elektrische Fahranteil UF_{EDS} nach Plötz et al. (2022) (Mittelwerte auf Modellebene (blaue Punkte) sowie lokaler Erwartungswert (schwarz)). Tabelle 5 vergleicht Mittelwerte herstellerspezifischer UF-Kennzahlen. Ausgewiesen werden sowohl der durchschnittliche Anteil km mit Verbrenner aus im CD-Mode (UF_{real}) als auch der energetische Utility Factor (UF_{ener}), jeweils bezogen auf

aggregierte Fahrzeug- und Beobachtungsdaten pro Marke. Ergänzend wird der Median des energetischen Utility Factors angegeben, um die Verteilung robuster gegenüber Ausreißern abzubilden.

Tabelle 5: Mittelwerte UF-Kennzahlen nach Marken, aufsteigend sortiert nach UF_{ener}

Marke	Anzahl Modelle	Anzahl Fahrzeuge	Mittelwert UF_{real} [%]	Mittelwert UF_{ener} [%]	Median UF_{ener} [%]
Porsche	94	11 307	23,3	0,8	0,0
Ferrari	12	1 242	12,3	2,9	2,9
Bentley	12	135	20,6	10,4	4,7
Mini	3	8 227	36,0	12,8	12,8
Lexus	3	4 045	33,9	21,3	27,5
MG	29	7 175	19,6	22,5	24,1
VW	29	32 936	30,0	24,7	22,9
Volvo	71	162 693	27,8	26,5	26,0
Audi	100	30 884	30,1	26,5	25,0
BMW	58	107 708	30,0	27,0	28,0
Hyundai	41	879	26,7	27,5	27,0
Mercedes-Benz	70	233 954	28,1	27,7	28,7
Jeep	39	40 873	24,7	27,7	29,7
DS	124	8 536	28,8	28,6	29,5
Mazda	9	18 102	28,8	29,4	32,3
Land Rover	162	30 080	20,9	30,1	29,2
Renault	6	47 587	30,8	20,3	30,1
Opel	42	9 004	32,6	30,4	34,0
Peugeot	197	40 075	33,1	31,0	32,0
Suzuki	11	808	28,5	31,6	30,4
Jaguar	34	3 471	23,7	31,7	28,9
Alfa Romeo	3	1 848	31,6	33,4	34,1
Citroën	67	11 070	35,5	33,5	32,0
Škoda	21	18 950	35,1	34,0	31,2
Kia	43	13 467	33,4	34,8	33,3
Mitsubishi	10	629	33,9	35,4	36,3
Cupra	36	29 805	33,2	36,1	36,7
Ford	59	79 186	33,4	36,7	38,5
Seat	31	10 389	35,9	38,9	37,1
Toyota	6	15 707	40,1	42,8	44,2

Quelle: Eigene Berechnungen

Die Ergebnisse zeigen eine erhebliche Streuung zwischen den Herstellern. Während einzelne Marken im Mittel energetische Utility Factors UF_{ener} von unter 10 Prozent erreichen, liegen andere Hersteller bei über 30 Prozent, in Einzelfällen sogar darüber. Dies deutet auf substanzielle Unterschiede sowohl in der technischen Auslegung der Fahrzeuge als auch im realen Nutzungsverhalten hin. Der Vergleich von Mittelwert und Median verdeutlicht zudem, dass bei mehreren Herstellern eine rechtsschiefe Verteilung mit einem hohen Anteil sehr niedriger elektrischer Fahranteile vorliegt.

3.2.3. Ergebnisse für UF-Kurven

Da die Regulierung mit dem UF eine explizite Annahme zum Verhältnis zur Abhängigkeit UF_{CD} von R_{CDC} macht, wird dieser Zusammenhang zuerst betrachtet. Für jedes Fahrzeug wurde dafür die CD-Mode-Reichweite R_{CDC} näherungsweise (da keine Konformitätszertifikate vorliegen) als nächstes

ganzzahliges Vielfaches einer WLTP-Länge zur elektrischen Reichweite berechnet. Anschließend wurden die Daten auf Fahrzeug-Modell-Ebene aggregiert. Daher sind die meisten X-Werte in der Abbildung nahe ganzzahliger Vielfacher der WLTP-Zykluslänge von 23,3 km und einige Werte sind Mittelwerte zwischen Modellvarianten mit verschiedenen ganzzahligen Vielfachen der WLTP-Zykluslänge.

Abbildung 20 zeigt Anteil CD-Mode-km UF_{CD} als Funktion der CD-Mode-Reichweite inkl. der Fahrzeugwerte aggregiert auf Modellebene sowie die WLTP-Kurve bis einschließlich 2024 (grau), die Kurven ab 2025 und 2027 (obere blaue Linie 2025, untere 2027) und den besten Fit für die Daten (orange).

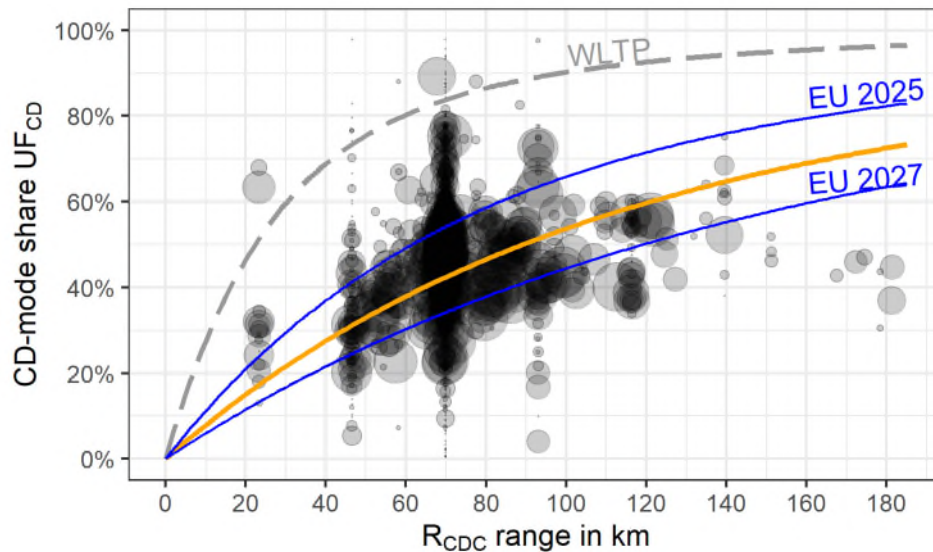


Abbildung 20: Anteil CD-mode km UF_{CD} als Funktion der CD-Mode-Reichweite R_{CDC}

Quelle: Eigene Berechnungen

Die nichtlineare Schätzung der Utility-Factor-Kurve auf Basis des Zusammenhangs zwischen dem Anteil der im CD-Mode gefahrenen Kilometer UF_{CD} und der CD-Mode-Reichweite R_{CDC} in der WLTP-UF-Funktion mit d_n als freiem ergibt einen Skalierungsparameter $d_n = 3190 \pm 70$ km (Punktschätzung ± 2 Standardfehler).⁹ Dieser Parameter bestimmt die Steilheit der UF-Kurve und liegt wie die Kurve in der Abbildung zwischen den Werten für 2025 ($d_n = 2200$ km) und 2027 ($d_n = 4260$ km). Das heißt, der reale CD-Nutzungsanteil liegt zwischen den aktuellen und zukünftigen regulatorischen Annahmen bzgl. CD-Mode-Nutzung. Da allerdings der reale CD-Kraftstoffverbrauch sehr viele höher als WLTP-CD-Mode-Kraftstoffverbrauch ist, ergibt sie mit diesem UF keine realistische Berechnung des mittleren Realverbrauches oder der mittleren CO_2 -Emissionen. Wenn durch die Anpassung des UF in der Regulierung der mittlere Realverbrauch wie bei verbrennungsmotorischen Pkw circa 20% über dem mittleren Normverbrauch liegen soll, muss der UF deutlich geringer sein als die 2027-Kurve bzw. d_n deutlich höher als der 2027er Wert (siehe unten).

Die Auswertung zeigt auch eine Reihe von einzelnen PHEV-Modellen, die im Fahrbetrieb sehr hohe Anteile von über 60 % im CD-Mode aufweisen. Es zeigt sich in der Detailanalysen jedoch, dass diese gleichzeitig jedoch deutlich geringeren Anteile an rein elektrischem Fahren mit ausgeschaltetem Verbrennungsmotor erreichen. Dieses Muster tritt sowohl bei Premiumfahrzeugen wie dem BMW X5 xDrive45e als auch bei volumenstarken Modellen wie dem Skoda Superb oder Seat Tarraco auf. Ein CD-Mode-Anteil von über 60 % bedeutet zunächst, dass diese Fahrzeuge einen

⁹ Eine analoge nichtlineare Regression auf Basis km-gewichtetet Modellmittelwerte statt Einzelfahrzeug-Mittelwerte ergibt $d_n = 3448 \pm 82$ km als beste Schätzung.

großen Teil der gefahrenen Kilometer mit aktivierter elektrischer Fahrstrategie zurücklegen. Die realen elektrischen Fahranteile zeigen jedoch, dass der Verbrennungsmotor in einem beträchtlichen Teil dieser CD-Modus-Kilometer weiterhin zumindest teilweise mitläuft. Dies deutet auf eine signifikante Diskrepanz zwischen technisch aktiviertem elektrischem Modus und tatsächlich emissionsfrei zurückgelegten Strecken hin. In der gesamten Stichprobe der 2023-er PHEV gibt es nur ein Modell mit mehr als 10 Fahrzeugen und mind. 50% elektrischem Fahranteil. Besonders ausgeprägt ist diese Differenz bei Modellen mit mittlerer elektrischer Reichweite, beispielsweise beim Skoda Superb (CD-Mode-Anteil rund 75%, Anteil km mit Verbrenner aus rund 36%, elektrische Reichweite ca. 130 – 140 km) oder verschiedenen MG-Modellen, die bei ähnlichen CD-Mode-Anteilen nur rund ein Viertel der Kilometer rein elektrisch fahren. Gründe hierfür können modell- oder softwarebedingte Motorlaufstrategien sein, etwa zur Sicherstellung von Leistungsanforderungen, Heizbedarf, Batterietemperaturmanagement oder aufgrund spezifischer Hybridkalibrierung. Bei leistungsstarken PHEVs wie dem Mercedes AMG GT 63 S E Performance verstärkt sich dieser Effekt nochmals: Trotz hoher CD-Mode-Anteile ist der reale elektrische Fahranteil minimal, da der Verbrennungsmotor häufig für dynamische Fahranforderungen oder Systemunterstützung zugeschaltet wird. Diese Muster verdeutlichen, dass der CD-Modus zwar ein wichtiges technisches Kriterium ist, aber keine verlässliche Aussage möglich ist, wie viel tatsächlich ohne Verbrennungsmotor gefahren wird.

Eine zweite nachstehende Auswertung in Abbildung 21 zeigt statt der Fahrzeug-gemittelten UF-Werte die km-gewichteten Mittelwerte auf Modellebene, d.h. Fahrzeuge mit höherer Fahrleistung werden stärker gewichtet. Dies ist sinnvoll, wenn es um die Emissionen der gesamten PHEV-Flotte geht und weniger um ein zufällig gewähltes Fahrzeug. Wie zu erwarten, sinken die mittleren UF bei km-Gewichtung, da Fahrzeuge mit höherer km-Leistung häufiger längere Fahrten aufweisen und seltener elektrisch fahren. Hier zeigt sich noch verstärkt, dass die 2025 UF-Kurve zu optimistisch im Vergleich zu den realen Nutzungsdaten ist und die 2027-Kurven mindestens angemessen ist.

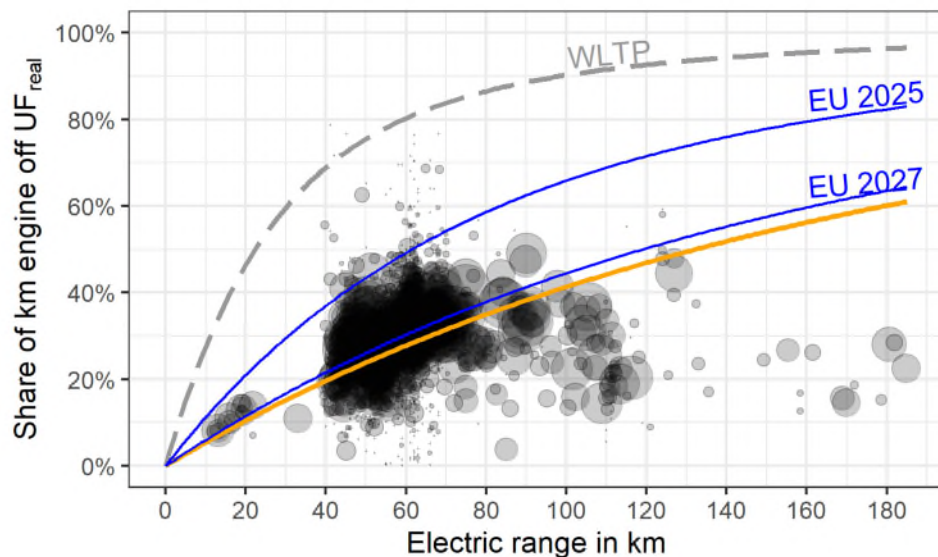


Abbildung 21: UF_{real} (Anteil CD-Mode-km mit Verbrenner aus) als Funktion der elektrischen Reichweite.

Quelle: Eigene Berechnungen

Da der Unterschied zwischen Anteil CD-Mode-km und elektrischem Fahranteil relativ ausgeprägt ist, zeigt nachstehende Abbildung noch einmal den mittleren UF_{real} auf Modellebene, d.h. den elektrischen Fahranteils als Anteil CD-Mode-km mit Verbrenner aus. Dann gibt es nur noch sehr wenige einzelne Fahrzeuge mit über 50% UF_{real} . Der beste Fit der UF-Kurve an die Daten mit d_n als freiem

Parameter liefert einen Skalierungsparameter $d_n = 4730 \pm 110$ km (Punktschätzung ± 2 Standardfehler) und entsprechend ist die Kurve für den UF tiefer als die 2027er Kurve mit $d_n = 4260$ km.

Schließlich zeigt Abbildung 22 noch die UF-Kurve für den energiebasierten UF_{ener} als Funktion der elektrischen Reichweite. Der beste Fit der UF-Kurve an die Daten mit d_n als freiem Parameter liefert einen Skalierungsparameter $d_n = 4764 \pm 123$ km (Punktschätzung ± 2 Standardfehler) und entsprechend ist die Kurve für den UF tiefer als die 2027er Kurve mit $d_n = 4260$ km.

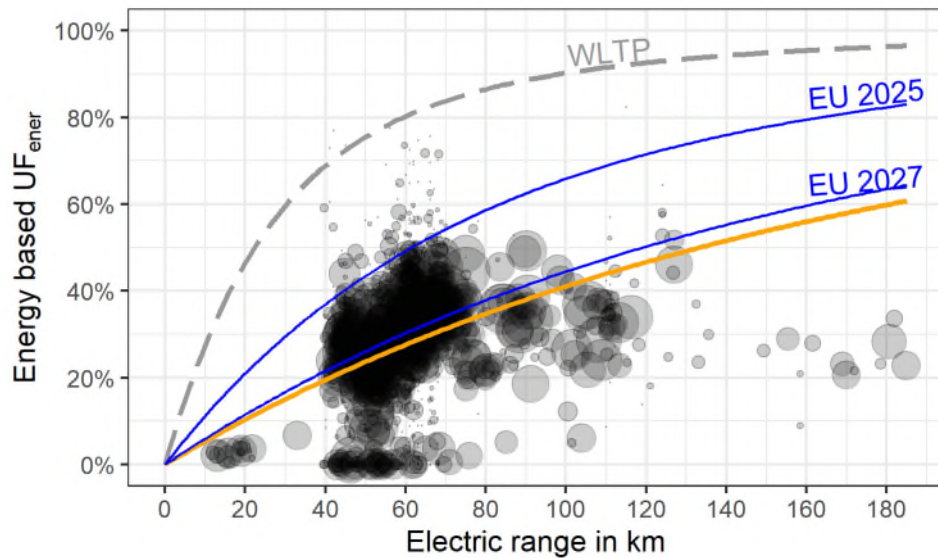


Abbildung 22: Energiebasierter UF_{ener} als Funktion der elektrischen Reichweite

Quelle: Eigene Berechnungen

Interessant ist auch der systematische Vergleich der mittleren UF als Funktion der elektrischen Reichweite (vgl. Abbildung 23).

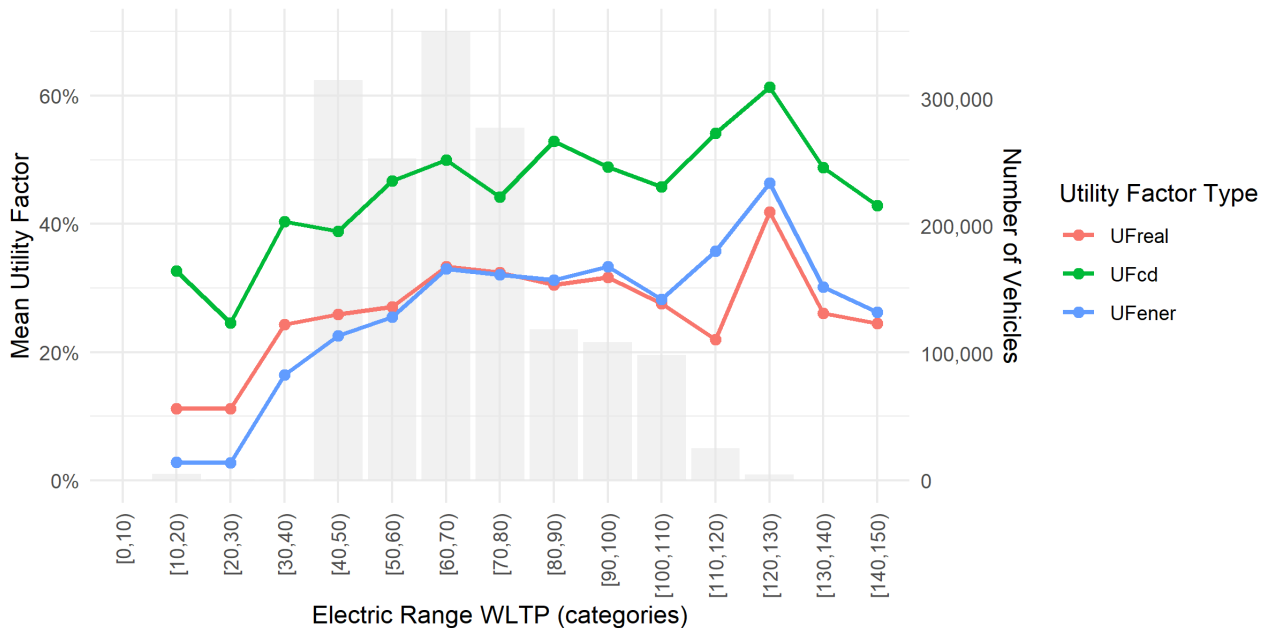


Abbildung 23: Mittlerer UF nach Reichweiten-Intervall und UF-Definition.

Quelle: Eigene Berechnungen

Der mittlere CD-Mode-Anteil UF_{CD} ist stets am höchsten, UF_{ener} und UF_{real} , die beide elektrische Fahranteile messen sollen sind nah beieinander. Weiterhin ist leichter Anstieg der mittleren UF mit der Reichweite bis ca. 80 km ersichtlich, danach sind die UF trotz weiterer steigender Reichweite eher konstant und steigen erst wieder ab 120 km Reichweite an, allerdings mit wenigen Fahrzeuge >120 km Reichweite in der Stichprobe.

Schließlich wurde auch noch der UF als elektrischer Fahranteil gemäß der Methodik in Appendix B von Plötz et al. (2022) berechnet: $UF_{EDS} = 1 - FC_{tot}^{real} / FC_{CS}^{real}$ anhand der OBFCM-Daten zum CS-Mode-Verbrauch und Gesamtverbrauch. Wie oben gezeigt, korreliert dieser UF_{EDS} sehr gut mit dem UF_{real} , d.h. dem Anteil im CD-mode mit Verbrennungsmotor aus. Die resultierende UF-Kurve in Abhängigkeit der elektrischen Reichweite ist wie in früheren Studien (vgl. Plötz et al. 2022) in Abbildung 24 gezeigt. Der beste Fit der UF-Kurve an die Daten mit d_n als freiem Parameter liefert einen Skalierungsparameter $d_n = 5147 \pm 135$ km (Punktschätzung ± 2 Standardfehler) und entsprechend ist die Kurve für den UF tiefer als die 2027er Kurve mit $d_n = 4260$ km. Das heißt, eine Fortsetzung der früheren Methodik nach Plötz et al. (2022), anhand derer die aktuell geplante Verschärfung der UF-Kurve geplant wurde ergibt die Notwendigkeit einer weiteren Verschärfung der UF-Kurve für PHEV in Europa.

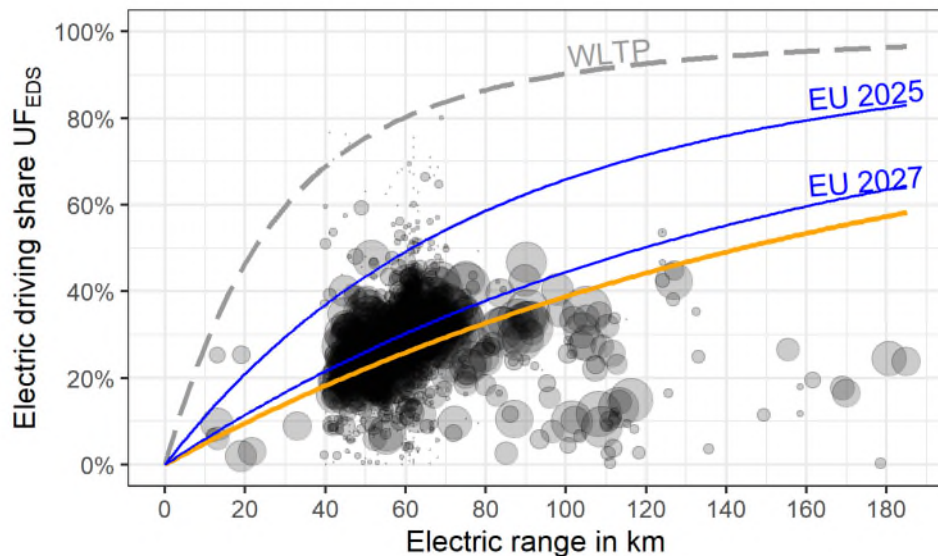


Abbildung 24: Elektrischer Fahranteil UF_{EDS} als Funktion der elektrischen Reichweite.

Quelle: Eigene Berechnungen

Berechnung der Realverbrauchslücke nach verschiedenen Regulierungen

Die Realverbrauchslücke wird für die verschiedenen Regulierungsstände (2024, 2025, 2027) auf Basis einer vereinfachten Methodik berechnet, die den real beobachteten, elektrischen Fahranteil auf Basis der elektrischen Energieverbräuche UF_{ener} berücksichtigt (gemäß Plötz et al. 2022). In dieser Methodik wird die PHEV-Nutzung in einen rein elektrischen und einen rein verbrennungsmotorischen Anteil zerlegt. Für den rein verbrennungsmotorischen Anteil wird der WLTP-Charge-Sustaining-Verbrauch FC_{CS}^{wltp} als 20% niedriger angenommen als der reale CS-Verbrauch FC_{CS}^{real} wie in den OBFCM-Daten direkt zu finden, d.h. $FC_{CS}^{wltp} = FC_{CS}^{real} / 1,2$. Der Verbrauch im rein elektrischen Modus wird als 0 l/100 km angesetzt, da im rein elektrischen Modus kein Kraftstoff verbraucht wird. Der hypothetische regulatorische WLTP-Verbrauch ergibt sich dann als gewichtete Kombination: $FC^{wltp} = (1 - UF_{regulation}) \cdot FC_{CS}^{wltp}$, wobei $UF_{regulation}$ durch die Utility-Factor-Funktion mit regulierungsspezifischen Skalierungsparametern d_n berechnet wird ($d_n = 800$ km vor 2025, $d_n =$

2200 km von 2025 – 2026 sowie $d_n = 4260$ km danach). Die Realverbrauchslücke wird dann aus dem tatsächlich gemessenen Realverbrauch und dem berechneten WLTP-Verbrauch ermittelt: $FCgap = (FC_{real} - FC^{wltp}) / FC^{wltp}$.

Für die Bestimmung eines optimalen Skalierungsparameters d_n , der eine mittlere gewichtete Realverbrauchslücke von 20% erreicht, wurde eine numerische Optimierung durchgeführt. Dabei wurde der d_n -Wert systematisch variiert und derjenige Wert identifiziert, bei dem die nach Fahrzeuganzahl gewichtete, mittlere Realverbrauchslücke 20% erreicht. Das optimale d_n beträgt hierbei $d_n = 7220$ km und spiegelt die realen Nutzungsmuster wider, bei denen die Lücke zwischen Typgenehmigung und Realverbrauch ausgeglichen wird.

Abbildung 25 die mittleren Realverbrauchslücken nach bisheriger, aktueller, zukünftiger und möglicher korrigierter Regulierung. Man erkennt deutlich, dass die knapp eine Million PHEV im Mittel ca. 300 % über ihren Nominalwerten liegt. Wären die Modelle nach der 2025er oder 2027er Regulierung zugelassen worden, wäre die Abweichung noch ca. 100 % oder ca. 40%, d.h. immer noch mehr als die mittlere Abweichung von ca. 20 % heutiger benzin- und Diesel-Pkw. Erst in einer angepassten hier simulierten Regulierung mit $d_n = 7.220$ km wäre die Abweichung mit ca. 20 % im Mittel mit Verbrenner-Pkw vergleichbar.

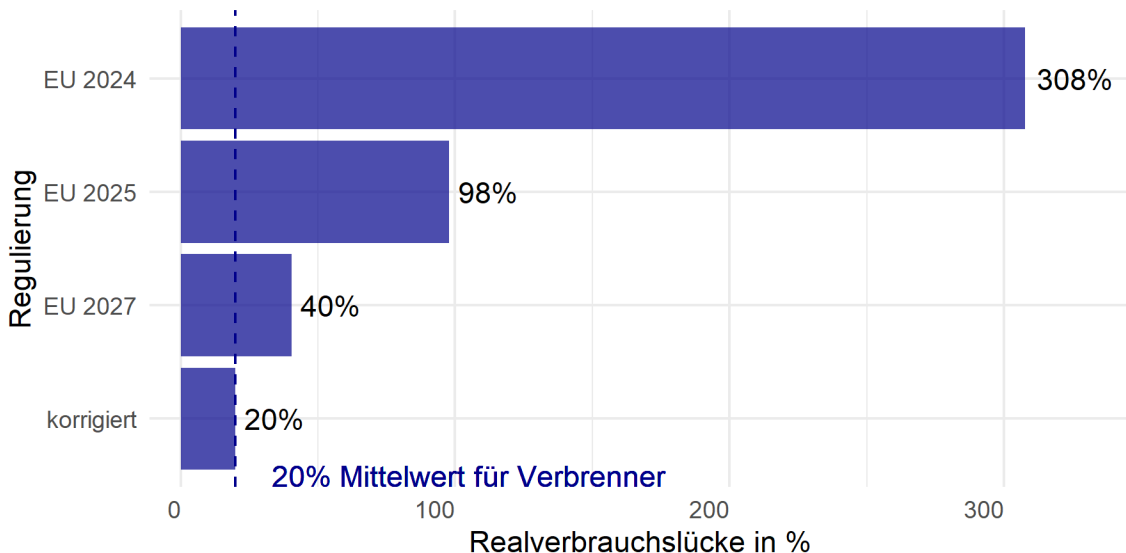


Abbildung 25: Differenz zwischen WLTP- und Realverbrauch von PHEV in Europa nach verschiedenen Regulierungen

Quelle: Eigene Berechnungen

Insgesamt zeigen die Analysen dieses Abschnitts, dass eine weitere Verschärfung der Utility-Faktor-Kurven auch über den bisher für 2027 geplanten Wert hinaus empirisch erforderlich ist, da alle empirischen Ansätze höhere Skalierungsparameter d_n als den für 2027 geplanten Wert von 4260 km ergeben.

3.2.4. Diskussion und Sensitivität

Die empirischen Analysen zu den elektrischen Fahranteilen und der Realverbrauchslücke zeigen die Notwendigkeit einer Verschärfung der Regulierung von PHEV in Europa über die für 2027 geplante Verschärfung hinaus. Allerdings bestehen gewisse methodische Unsicherheiten in der Berechnung der Realverbrauchslücke. Wir sind hier der Methode von Plötz et al. 2022 gefolgt, da diese seit mehreren Jahren verfügbar ist und auch durch verschiedene Autoren geprüft wurde. Allerdings

gibt es andere Ansätze wie eine Realverbrauchslücke berechnet werden könnte. In diesem Abschnitt sollen die methodischen Unsicherheiten und andere Varianten zur Berechnung einer realverbrauch Lücke diskutiert werden.

Die hier verwendete Methode für die Berechnung der Realverbrauchslücke basiert auf der Annahme, dass der funktionale Zusammenhang zwischen elektrischem Fahranteil und elektrischer Reichweite, also $UF_{\text{ener}}(\text{EAER})$, exakt der gleiche ist wie zwischen dem in der Regulierung verwendeten Anteil km im CD-Mode und der CD-Mode-Reichweite, d.h. $UF_{\text{CD}}(R_{\text{CDC}})$. Nun zeigen aber die Abbildungen 20 im Vergleich zu den Abbildungen 21, 22, und 24 oben inkl. der erhaltenen Skalierungsparameter d_n , dass diese Annahme vielleicht eine gute Näherung aber nicht exakt zutreffend ist. Dies führt unter anderem dazu, dass eine Berechnung der Realverbrauchslücke mit diesem Ansatz für die 2024er Regulierung, nach der alle PHEV im Datensatz zugelassen wurden, zu einer Realverbrauchslücke von 440 % statt der beobachteten 308 % führen. Weiterhin bestehen gewisse Unsicherheiten bzgl. der Differenz von 20 % zwischen den realen und offiziellen CS-Mode-Verbräuchen.

Zum Vergleich wurde für die vorliegende Studie ein weiterer und neuer Ansatz zur Bestimmung der Verbrauchslücke entwickelt. Dafür berechnen wir eine neue UF-Kurve mit einem neuen UF_{corr} so, dass die daraus berechneten Typgenehmigungsverbräuche und -Emissionen nur ca. 20 % kleiner sind als die mittleren Realverbräuche und -emissionen. D.h. dieser zusätzliche UF_{corr} wird durch folgende Gleichung impliziert definiert: $FC^{\text{real}} = 1.2 (UF_{\text{corr}} \cdot FC_{\text{CD}}^{\text{wltp}} + (1 - UF_{\text{corr}}) \cdot FC_{\text{CS}}^{\text{wltp}})$. Für die Berechnung benötigen wir Näherungswerte für die nicht vorliegenden CS- und CD-Mode-Verbräuche im WLTP. Dies erfolgt in mehreren Schritten aus Ebene der Modellmittelwerte:

1. Der WLTP-CS-Mode-Verbrauch $FC_{\text{CS}}^{\text{wltp}}$ wird als 20% kleiner als der reale CS-Mode-Verbrauch angenommen und aus diesem berechnet, da die Fahrzeuge in diesem Modus fast nur verbrennungsmotorisch fahren und Verbräuche verbrennungsmotorischer Pkw ca. 20% über den WLTP-Werten liegen, d.h. $FC_{\text{CS}}^{\text{wltp}} = FC_{\text{CS}}^{\text{real}}/1,2$.
2. Der WLTP-CD-Mode-Verbrauch $FC_{\text{CD}}^{\text{wltp}}$ wird aus dem bekannten gemischten WLTP-Verbrauch $FC_{\text{mix}}^{\text{wltp}} = FC_{\text{CD}}^{\text{wltp}} \cdot UF(R_{\text{CDC}}) + (1 - UF(R_{\text{CDC}})) \cdot FC_{\text{CS}}^{\text{wltp}}$ durch umstellen der Gleichung nach $FC_{\text{CD}}^{\text{wltp}} = (FC_{\text{mix}}^{\text{wltp}} - (1 - UF) \cdot FC_{\text{CS}}^{\text{wltp}}) / UF$ berechnet.
3. Mit den Werten für kann dann mit einer neuen UF-Kurve, bspw. der 2027-er Kurve mit $d_n = 4260$ km, ein gemischter WLTP-Verbrauch nach geänderter Regulierung mit neuem $\widehat{UF}$ berechnet werden $FC_{\text{mix}}^{\text{wltp}} = FC_{\text{CD}}^{\text{wltp}} \cdot \widehat{UF} + (1 - \widehat{UF}) \cdot FC_{\text{CS}}^{\text{wltp}}$.
4. Die Lücke zwischen Real- und Nominalverbrauch ist dann $(FC^{\text{real}} - FC^{\text{wltp}}) / FC^{\text{wltp}}$.

Dieser Ansatz ist sehr nah an der offiziellen Berechnung des gemischten WLTP-Verbrauches und für ein Beispielfahrzeug nach Dornoff (2021) ist der erhaltene CD-Mode-Verbrauch sehr nah am tatsächlichen. Allerdings vernachlässigt der obige Ansatz, dass der CD-Mode-Verbrauch nicht unabhängig von einer UF-Kurve berechnet werden kann, weil der CD-Mode-Verbrauch genau genommen der UF-gewichtete Mittelwert der WLTP-Phasen-Verbräuche ist und keine vom UF unabhängige Größe.¹⁰ Trotzdem wurde auch dieser neue Ansatz hier verwendet, um einen Vergleich zu dem obigen auch mit Unsicherheiten behafteten Ansatz zu haben.

Mit diesem zweiten Ansatz ergeben sich ähnliche Realverbrauchslücken der PHEV wie oben beschrieben: Mit der veränderten Utility-Faktor-Kurve 2025 wäre die Verbrauchslücke im Mittel ca. 100% und bei der geplanten weiteren Anpassung ab 2027 würde diese weiter auf ca. 50 % im

¹⁰ Dank an Jan Dornoff (ICCT) für diesen Hinweis und wichtige Diskussion zu diesem Punkt.

Fahrzeugmittel sinken. Schließlich wurde eine neue Utility-Faktor-Kurve mit angepasstem Skalierungsparameter $d_n = 10.000$ km so bestimmt, dass die mittlere Verbrauchslücke für PHEV ca. 20 % beträgt. Auch in diesen alternativen Ansatz für die Berechnung der Realverbrauchslücke ergibt sich also die empirische Notwendigkeit einer weiteren Verschärfung der UF-Kurve auch über den 2027er Wert hinaus.

Der folgende methodische Kasten fasst noch einmal die verschiedenen UF-Ansätze zusammen.

Methodische Einordnung der verschiedenen Utility-Factor-Ansätze

In der Analyse werden mehrere Utility-Factor-(UF)-Konzepte verwendet, die unterschiedliche Fragestellungen adressieren und daher nicht unmittelbar miteinander vergleichbar sind. Welcher Utility Factor beantwortet welche Frage?

1. UF_{CD} (regulatorisch): Wie werden CD- und CS-Phasen formal im Typgenehmigungsverfahren gewichtet? Enthält keine Aussage über elektrischen Fahranteil.
2. UF-Ansätze zur Messung elektrischer Fahranteile:
 - a) UF_{real}: Welcher Anteil der CD-Mode-Kilometer wird tatsächlich rein elektrisch gefahren?
 - b) UF_{EDS}: Wie hoch ist der reale elektrische Fahranteil gemessen am Realverbrauch?
 - c) UF_{ener}: Wie groß ist der Anteil elektrisch bereitgestellter Antriebsenergie an der Gesamtantriebsenergie?
3. Empirisch korrigierter UF: Welcher UF-Parameter ist erforderlich, um die Realverbrauchslücke der PHEV-Flotte regulatorisch zu schließen?

Der in der europäischen Regulierung verankerte UF_{CD} basiert ausschließlich auf dem Anteil der im Charge-Depleting-Mode zurückgelegten Kilometer und dient der formalen Gewichtung von CD- und CS-Phasen im Typgenehmigungsverfahren. Er trifft keine explizite Aussage über den elektrischen Fahr- oder Energieanteil und ist primär eine regulatorische Rechengröße.

Demgegenüber stehen empirische UF-Ansätze wie UF_{EDS}, UF_{real} und UF_{ener}, die reale Nutzungsdaten aus OBFCM auswerten und darauf abzielen, den tatsächlichen elektrischen Nutzungsanteil von Plug-in-Hybridfahrzeugen auf Kilometer- oder Energieebene zu beschreiben. Diese Ansätze liefern konsistente Skalierungsparameter im Bereich von etwa 4 700 bis 5 900 km und eignen sich zur Analyse realer Fahr- und Ladeverhalten.

Der empirisch korrigierte Utility Factor verfolgt eine andere Zielsetzung. Er dient nicht der Beschreibung elektrischer Nutzung, sondern der Kalibrierung der regulatorischen CO₂-Bewertung an reale Kraftstoffverbräuche. Der daraus abgeleitete höhere Skalierungsparameter ($\approx 10\,000$ km) ist erforderlich, um die durchschnittliche Realverbrauchslücke von PHEV auf ein mit konventionellen Fahrzeugen vergleichbares Niveau zu reduzieren. Die unterschiedlichen UF-Ergebnisse widersprechen sich daher nicht, sondern reflektieren unterschiedliche analytische und regulatorische Zielsetzungen.

Schließlich zeigt Abbildung 26 eine zusätzliche Sensitivität des erhaltenen Skalierungsparameters d_n für drei hier betrachtete empirische UF in Bezug auf unterschiedliche minimale PHEV-Reichweiten. Der Grund dafür ist, dass neuere PHEVs oft eine größere Reichweite haben als viele ältere Modelle und möglicherweise andere UF-Werte erreichen oder andere UF-Kurven implizieren. Die Ergebnisse zeigen, dass aktuelle PHEVs mit großer Reichweite noch weniger elektrisch fahren als

alle PHEVs und auch eine deutliche Erhöhung des Skalierungsparameters der UF-Kurve erfordern würden.

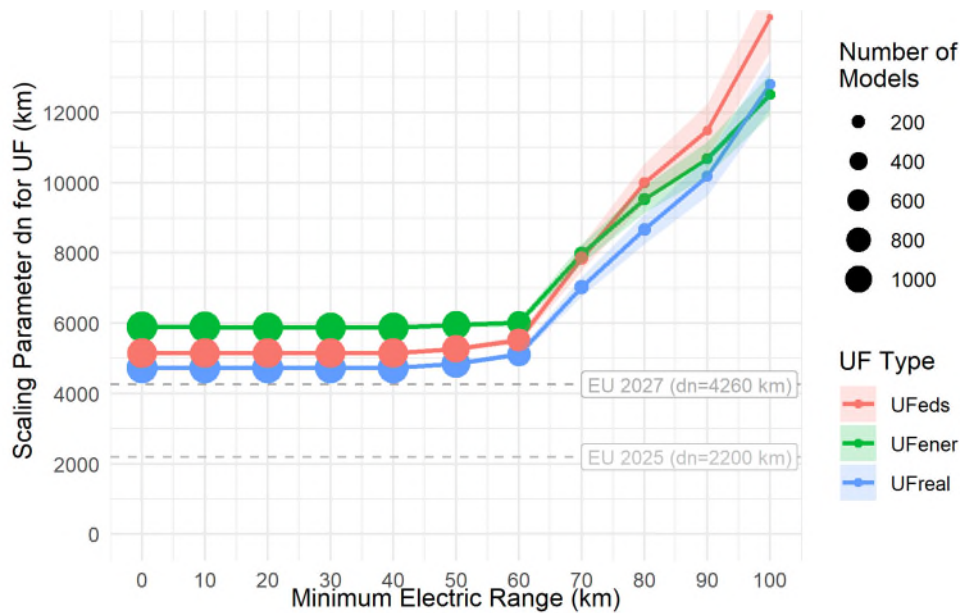


Abbildung 26: Sensitivität des empirischen Skalierungsparameters ggü. PHEV-Reichweite

Quelle: Eigene Berechnungen

Insgesamt ergibt sowohl der alternative Ansatz für die Berechnung der Realverbrauchslücke als auch eine Sensitivität für PHEV mit hoher Reichweite eine Notwendigkeit einer weiteren Verschärfung der UF-Kurve auch über den 2027er Wert hinaus.

3.2.5. Fazit

Aufgrund der Komplexität der PHEV-Regulierung und der Verschiedenen Ansätze in der Regulierung und in der Literatur mit Realdaten einen Utility-Faktor zu berechnen, ergeben sich eine Reihe von Skalierungsfaktoren und resultierenden Verbrauchslücken für PHEV. Nachstehende Tabelle fasst die Ergebnisse bzgl. Skalierungsparameter d_n und resultierender Verbrauchslücke für verschiedene Ansätze zusammen.

Tabelle 6: Ergebnisse Skalierungsparameter d_n und Verbrauchslücke nach Ansätzen

Ansatz	y-Achse	x-Achse	Parameter d_n [km]	Mittlere Verbrauchslücke
EU-Regulierung bis 2024	UF _{CD}	R _{CDC}	800	308 %
EU-Regulierung 2025 – 2026	UF _{CD}	R _{CDC}	2200	100 %
EU-Regulierung ab 2027	UF _{CD}	R _{CDC}	4260	40 %
Korrigierte Regulierung	UF _{ener}	Elektr. Reichweite	7220	20 %
Anteil CD-Mode	UF _{CD}	R _{CDC}	3190 ± 70	59 %
Anteil CD-Mode Verbrenner aus	UF _{real}	Elektr. Reichweite	4730 ± 110	35 %
Realverbrauchsbasiert	UF _{EDS}	Elektr. Reichweite	5147 ± 135	31 %
Energiebasiert	UF _{ener}	Elektr. Reichweite	5890 ± 150	26 %

Quelle: Eigene Darstellung

3.3. Bewertung VDA-Forderungen auf Einzelfahrzeugebene

3.3.1. Forderungen des VDA

Der VDA hat im Oktober 2025 zwei Kurzpapiere zu Plug-in Hybrid Fahrzeugen veröffentlicht, in denen Forderungen an die Politik zusammengefasst sind (VDA 2025a, VDA 2025b). Im Wesentlichen geht es dabei um ein Aussetzen der Verschärfung der Utility Factor Berechnung in (EC 2023) auf der einen Seite und zum anderen um mögliche Maßnahmen zur Erhöhung des Utility Factors. Im Folgeabschnitt 3.1.2 werden die Argumente des VDA diskutiert und Konsequenzen einer Aussetzung dargelegt. In Abschnitt 3.1.3 werden die genannten Maßnahmen zur Erhöhung des Utility Factors hinsichtlich ihrer Wirkung, ihrer Umsetzbarkeit, Überwachbarkeit und Zielkonflikten sowie bezüglich ihrer Vor- und Nachteile bewertet.

3.3.2. Aussetzen der Anpassungen

Der VDA fordert ein Aussetzen der UF-Verschärfung zum 1. Januar 2026 und eine Verschiebung bis zum Abschluss des CO₂-Reviews. Er werden verschiedene Begründungen genannt, die nachfolgend diskutiert werden.

„Die bisherige [OBFCM-]Datenerhebung ist noch unzureichend, so dass die [...] Anpassung des Utility Factor [...] nicht umsetzbar ist.“

Mit 1,4 Millionen PHEV-Datensätzen aus den Jahren 2021-2023 liegt eine robuste und statistisch hochsignifikante empirische Grundlage vor. Die Stichprobe umfasst damit rund 30 - 40% der europäischen PHEV-Flotte im europäischen Fahrzeugbestand (3,2 Mio. Ende 2023 nach EAFO) und deckt alle relevanten Hersteller und Modelle ab. Die Datenqualität ist hoch, da die OBFCM-Systeme gesetzlich verpflichtend sind und standardisiert erhoben werden. Das Argument "unzureichende Datenbasis" ist daher aus wissenschaftlicher Sicht nicht haltbar. Die verfügbaren Daten sind umfangreicher und repräsentativer als die ursprünglichen Annahmen, auf denen die bisherigen UF-Kurven basierten.

„Angesichts des verlangsamten Markthochlaufs batterieelektrischer Fahrzeuge [...] setzen wir uns mit Nachdruck dafür ein, die zukünftige Rolle von PHEVs [...] [als Übergangstechnologie] zu stärken.“

Dieses Argument wird schon lange angeführt und war zu Zeiten von sehr beschränkten Reichweiten auch durchaus begründbar. Heute sind PHEV jedoch häufig teurer als reine Elektrofahrzeuge mit großen Reichweiten und aufgrund der sehr niedrigen elektrischen Fahranteile auch aktuell nicht als Verbesserung gegenüber Verbrennern zu sehen. Bei konventionellen Verbräuchen von im Mittel 2,7 l/100 km im Charge-Depleting-Mode, dem Modus, in dem man den elektrischen Antrieb maximal nutzt, ist dies auch eher darauf zurückzuführen, dass die Mehrheit der Fahrzeuge eher als Hybridfahrzeuge mit Lademöglichkeit konzipiert sind. Zudem werden PHEV teilweise als Übergangstechnologie hin zu reinen Elektrofahrzeugen betrachtet, aber die empirische Datenlage dazu ist noch nicht gegeben. Anekdotisch gibt es beide Fälle: PHEV-Nutzer, die das elektrische Fahren genießen und anschließend einen BEV nutzen aber auch PHEV-Nutzer, die unzufrieden sind weder ganz verbrennungsmotorisch noch ganz elektrisch zu fahren und wechseln anschließend auf einen reinen Verbrenner zurück (Hardman & Tal, 2021)

„Anreizverlust für Reichweitensteigerung [von neuen PHEV-Modellen]“

Basierend auf den OBFCM-Daten gibt es höhere UF-Werte in Abhängigkeit der Reichweiten, allerdings folgen diese sehr klar den in der Regulierung angenommenen Regressionen. Höhere Reichweite kann mangelnde Regelmäßigkeit beim Laden nicht kompensieren. Internationale Märkte wie China oder die USA verlangen überdies auch hohe elektrische Reichweiten unabhängig von der EU-Regulierung, teilweise basierend auf heimischen Regulierungen.

Der VDA hebt die positiven Entwicklungen bei PHEV hervor:

- Reichweiten von 100-130 km bei neuen Modellen
- Schnellladefähigkeit (DC bis 60 kW, AC bis 11 kW)
- Range-Extender-Konzepte mit Electric-First-Logik

Diese Entwicklungen sind zu begrüßen. Allerdings zeigen die OBFCM-Daten, dass auch moderne PHEV mit höheren Reichweiten den realen elektrischen Fahranteil nicht im erwarteten Maße steigern. Plötz und Gnann (2025) weisen auf eine systematische Abweichung hin: PHEV mit über 60 km Reichweite liegen tendenziell unter der ab 2025 geltenden UF-Kurve, während kürzere Reichweiten eher darüber liegen. Dies deutet darauf hin, dass längere Reichweiten allein das Nutzungsverhalten nicht ausreichend verändern. Weiterhin ist kaum zu erwarten, dass die im Vergleich zu BEV geringe DC-Ladeleistung von 60 kW ausreicht, um auf Langstrecken zusätzliche Ladestopps einzulegen. Das wäre eher bei einem Range-Extender-Fahrzeug mit elektrischer Reichweite über 200 km mit Ladeleistungen über 100 kW zu erwarten.

„Regulatorische Gefährdung der PHEV-Weiterentwicklung“ und „Technologische Weiterentwicklungen [...] benötigen jedoch regulatorische Planungssicherheit“

Die wirtschaftlichen Herausforderungen der Automobilindustrie sind real und ernst zu nehmen. Allerdings ist zu beachten, dass die UF-Anpassungen bereits 2023 beschlossen wurden und für neue Typen seit 1.1.2025 in Kraft sind. Die Industrie hatte also einen hinreichenden Vorlauf. Weiter können Investitionen in PHEV-Technologie auch unter realistischeren UF-Kurven rentabel sein, wenn die Fahrzeuge tatsächlich überwiegend elektrisch gefahren werden. Ein Aussetzen würde zudem Hersteller bevorzugen, die auf PHEV mit geringem realem elektrischem Fahranteil setzen, gegenüber solchen, die in reine BEV investieren. Auch kann eine Regulierung, die auf offensichtlich veralteten empirischen Daten basiert, nicht als planungssicher angesehen werden.

Konsequenzen eines Aussetzens der Regulierung

Ein Aussetzen der UF-Verschärfung würde bedeuten:

1. Fortgesetzte systematische Unterschätzung der CO₂-Emissionen in der Flottenregulierung. Die OBFCM-Daten zeigen, dass selbst die 2025-Kurve noch zu optimistisch ist.
2. Gefährdung der EU-Klimaziele, da die realen Flottenemissionen deutlich höher wären als regulatorisch erfasst
3. Irreführung von Verbraucherinnen und Verbrauchern durch realitätsferne Angaben bzgl. Kraftstoffverbrauch und CO₂-Emissionen.
4. Ungerechtfertigte Bevorzugung von PHEV gegenüber effizienten Verbrennern oder BEV
5. Fehlanreize für Hersteller, da niedrige offizielle CO₂-Werte auch mit geringem realem elektrischem Fahranteil erreichbar bleiben

Die geplante UF-Anpassung für 2027 sollte nach Meinung der Autoren wie geplant umgesetzt werden. Sie liegt im empirisch ermittelten sinnvollen Bereich. Eine weitere Verzögerung würde den Übergang zu emissionsfreier Mobilität verzögern und die Glaubwürdigkeit der EU-Klimapolitik untergraben.

3.3.3. Maßnahmen zur Erhöhung des Utility Factors

Der VDA schlägt ergänzende Maßnahmen zur Steigerung des elektrischen Fahranteils vor:

1. **Inducement (Ladepflicht):** Beim Inducement soll eine Ladung nach einer bestimmten Fahrleistung (z.B. alle 500 Kilometer) vorgeschrieben sein. Nach Warnhinweisen und Ablauf eines Zeitfenster wäre auch eine Reduktion der Systemleistung denkbar.
2. **Geofencing:** Hier wird der elektrische Fahrmodus in vordefinierten Zonen (z.B. Umweltzonen und Innenstädten) automatisch aktiviert. Dies erfolgt auf Basis von GPS-Informationen und wäre für alle neuen PHEV verpflichtend.
3. **Display-Transparenz:** Im Bordmenü soll der elektrische Fahranteil angezeigt werden und auch ein statistischer Vergleich mit anderen Nutzern soll möglich sein. Auch sind Hinweise zur Verbesserung der elektrischen Nutzung denkbar.

Diese drei Maßnahmen werden im Folgenden diskutiert.

Inducement

Umsetzbarkeit & Überwachbarkeit: Die Fahrzeugsoftware kann Ladevorgänge und Kilometerleistung überwachen und die Leistung entsprechend begrenzen. Ähnliche Systeme existieren bereits bei Emissionskontrollsystemen.

Herausforderungen

- Die Definition angemessener km-Grenzen, welche die Heterogenität der Nutzer berücksichtigt (Unterschiede zwischen Stadt/Land, Viel-/Wenigfahrern, Privat-/Dienstwagennutzer)
- Wie werden Ausnahmefälle, wie beispielsweise Notfälle, fehlende Ladeinfrastruktur oder technische Defekte behandelt?
- Das System funktioniert nur, wenn Laden überall möglich und erschwinglich ist.

Vorteile

- Erzwingt regelmäßiges Laden auch bei "Nie-Ladern"
- Wirkt unabhängig vom Fahrprofil
- Psychologischer Effekt: Nutzer gewöhnen sich an Laderituale

Nachteile

- Stark abhängig von Strompreisen: Wenn öffentliches Laden teurer ist als Tanken, geringe Akzeptanz
- Das Inducement birgt eine hohe Gefahr der Nutzerunzufriedenheit und negativer öffentlicher Wahrnehmung

- Minimale Ladevorgänge könnten Vorgaben ohne echte Nutzungsänderung erfüllen
- Haushalte ohne private Lademöglichkeit wären überproportional betroffen, was eine Gerechtigkeitsdebatte nach sich ziehen könnte.

Mögliche Auswirkungen: Ein erzwungenes Laden nach einer bestimmten Strecke, wie vom VDA geäußert, hätte nur eine hohe Wirkung, wenn das Ladeintervall ausreichend klein ist. Vereinfacht dargestellt sind die theoretischen Utility Factors in Abbildung 27 (oben) in Abhängigkeit von verschiedenen Reichweiten. Hier sieht man deutlich, dass bereits ab 200 km Ladeintervall die der Utility Factor bereits nur noch bei 50% (für elektrische Reichweiten von 100km) oder darunter liegt (geringere elektrische Reichweiten). Für zukünftige große elektrische Reichweiten von 200 km können bei kleinen Ladeintervallen auch hohe UFs erzielt werden. Für Laden alle 1000 km läge man für PHEV mit 200 km Reichweite bei 20% UF, für geringere Reichweiten entsprechend darunter. Während bei einer elektrischen Reichweite von 80 km im WLTP von einem UF von 90% ausgegangen wird, würde selbst ein Inducement alle 100 km nicht ausreichen, um diesen UF auch in der Realität zu erreichen.

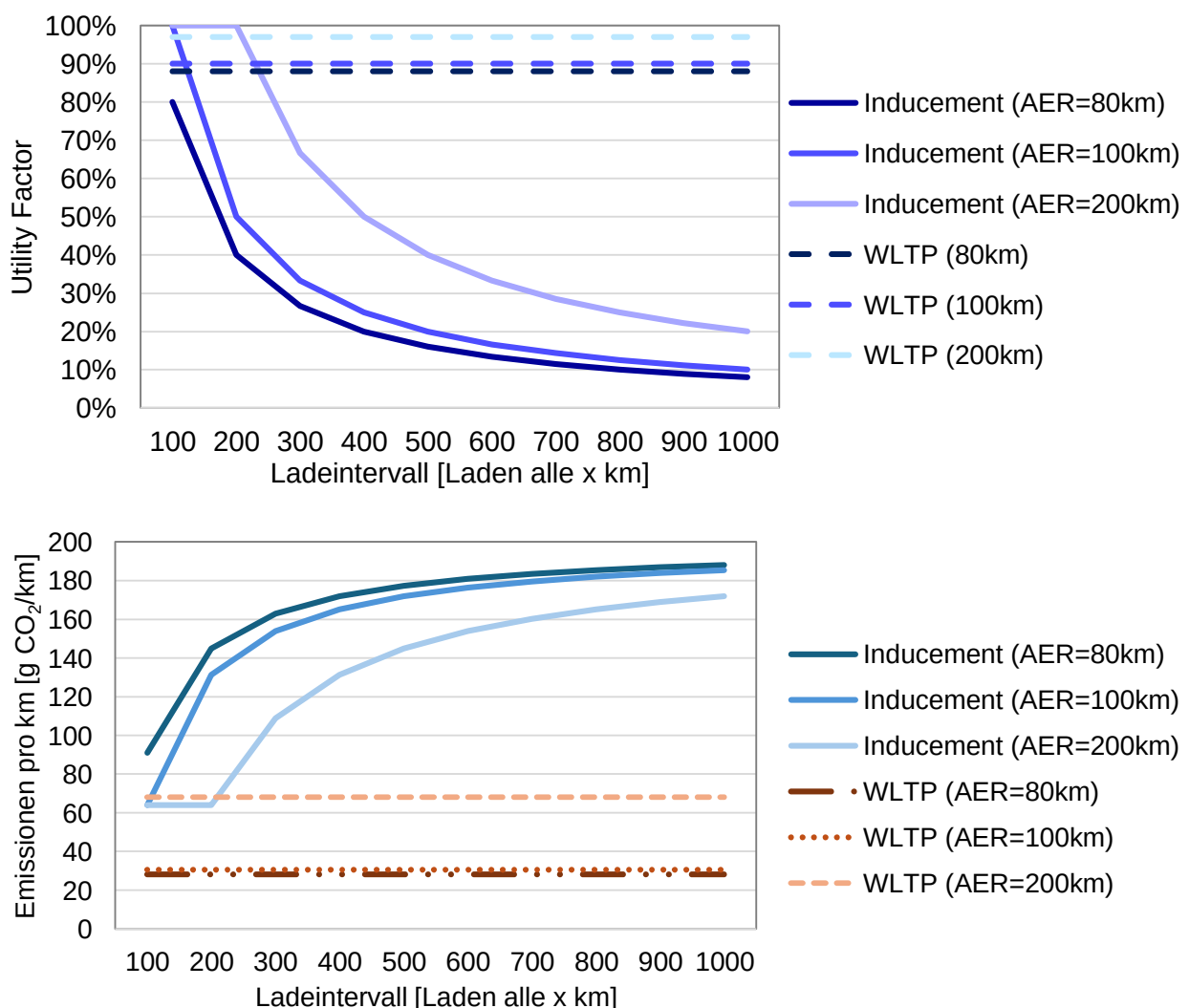


Abbildung 27: Theoretischer Utility Factor und CO₂-Emissionen mit vorgegebenen Ladeintervall und unterschiedlichen elektrischen Reichweiten

Quelle: Eigene Berechnungen

Zum Vergleich sind in beiden Abbildungen auch der Utility Factor und die Emissionen nach WLTP dargestellt. Um nun UFs gemäß WLTP in der Realität zu sehen und die Regulierung entsprechend

anzupassen, müsste ein Nachladen an den Schnittpunkten der jeweiligen Reichweiten erzwungen werden. Oder vereinfacht, man müsste das Fahrzeug immer nachladen, wenn man unterhalb des UF gemäß WLTP liegt. Diese Schnittpunkte lägen für 80 km Reichweite bei 88 km Ladeintervall, für 100 km Reichweite bei 111 km Ladeintervall und für 200 km Reichweite bei 206 km Ladeintervall, um die UF von 88%, 90% und 97% zu erreichen.¹¹

Die realen Emissionen für verschiedene Ladeintervalle sind in Abbildung 28 unten aufgetragen. Hier emittieren PHEV mit 100% UF die Emissionen im CD-Mode, der auf Basis der OBFCM-Daten bei 64 g CO₂/km liegt (Verbrauch im Mittel 2,7 l Benzin) (T&E 2025, Plötz und Gnann 2025). So kommen bei geringeren UF auch mit hohen Reichweiten sehr hohe Emissionswerte zustande (100 g CO₂/km bei 200 km Reichweite und ~250 km Ladeintervall). Nur bei elektrischen Reichweiten von 200 km und einem fast ausschließlichen Fahren im CD-mode kann können die WLTP-Emissionen erreicht werden.¹²

Dies stellt jedoch nur eine theoretische Betrachtung dar, da sie davon ausgeht, dass jeden Tag gleich gefahren wird, oder immer nach x km nachgeladen wird. Das widerspricht insbesondere dem angedachten Konzept von PHEV, die bei langen Strecken den Verbrennungsmotor anstelle des elektrischen Antriebs nutzen, wenn die Batterie leer ist. Diese langen Fahrten sind selten, umfassen jedoch einen nennenswerten Anteil der Jahresfahrleistung (Plötz 2014, Plötz et al. 2017). In der Realität fahren Privatanutzer an durchschnittlichen Tagen rund 32,5 km, an etwa 24 Tagen im Jahr werden jedoch Strecken über 100 km gefahren (im Mittel 163 km an diesen Tagen) mit 27% der Jahresfahrleistung (Rechnungen basierend auf (Plötz 2014, Plötz et al. 2017, Gnann et al. 2018, Gnann 2015)). Die Jahresfahrleistung liegt bei etwa 14.000 km. Dienstwagennutzer hingegen fahren 38,6 km an durchschnittlichen Tagen und etwa 25.000 km im Jahr. An rund 65 Tagen im Jahr überschreiten sie die 100 km Tagesdistanz (im Mittel dann 226 km) mit 58% der Jahresfahrleistung (Rechnungen basierend auf (MOP 2010, Gnann et al. 2018)).

Würde man nun das Laden alle 100, bzw. 200 km zugrunde legen und davon ausgehen, dass lange Fahrten nicht durch Ladepausen unterbrochen würden, so müssten Privat-Pkw alle drei, bzw. sechs Tage und Dienstwagen alle drei, bzw. fünf Tage nachgeladen werden. Berücksichtigt man zudem die langen Fahrten wie oben genannt, dann verändern sich der mittlere Utility Factor und die CO₂-Emissionen wie in Abbildung 31 dargestellt.

Ein Privatfahrzeug mit 100 km elektrischer Reichweite und Laden alle 5 Tage käme auf einen UF von 54%, während Dienstwagen mit Laden alle 3 Tage bei etwa 47% lägen. Da insbesondere Dienstwagen einen Großteil der heutigen PHEV umfassen, ist die Wirkung also noch geringer als mit der vereinfachten Darstellung in Abbildung 30 einzuschätzen. Entsprechend sind Kraftstoffverbrauch und Emissionen auch höher.

Eine deutliche Verbesserung könnte hingegen die Erhöhung der Ladehäufigkeit mit sich bringen. Mit täglichem Laden sind UF von 80% für Privatfahrzeuge und bis zu 60% für Dienstwagen auch bei kleinen Reichweiten denkbar.

¹¹ Dieses für den WLTP-UF notwendige Ladeintervall kann berechnet werden als Ladeintervall = Reichweite / WLTP-UF.

¹² Die WLTP-Emissionen basieren auf den OBFCM-Daten und sind Mittelwerte der darin enthaltenen Fahrzeugmodelle in einem Reichweitenbereich von der 80, 100, 200km +/- 10km. Für 80 km Reichweite sind dies 81 Modelle und 132.161 Fahrzeuge, für 100 km 33 Modelle mit 69.092 Fahrzeugen und für 200 km Reichweite 12 Modelle mit 457 Fahrzeugen.

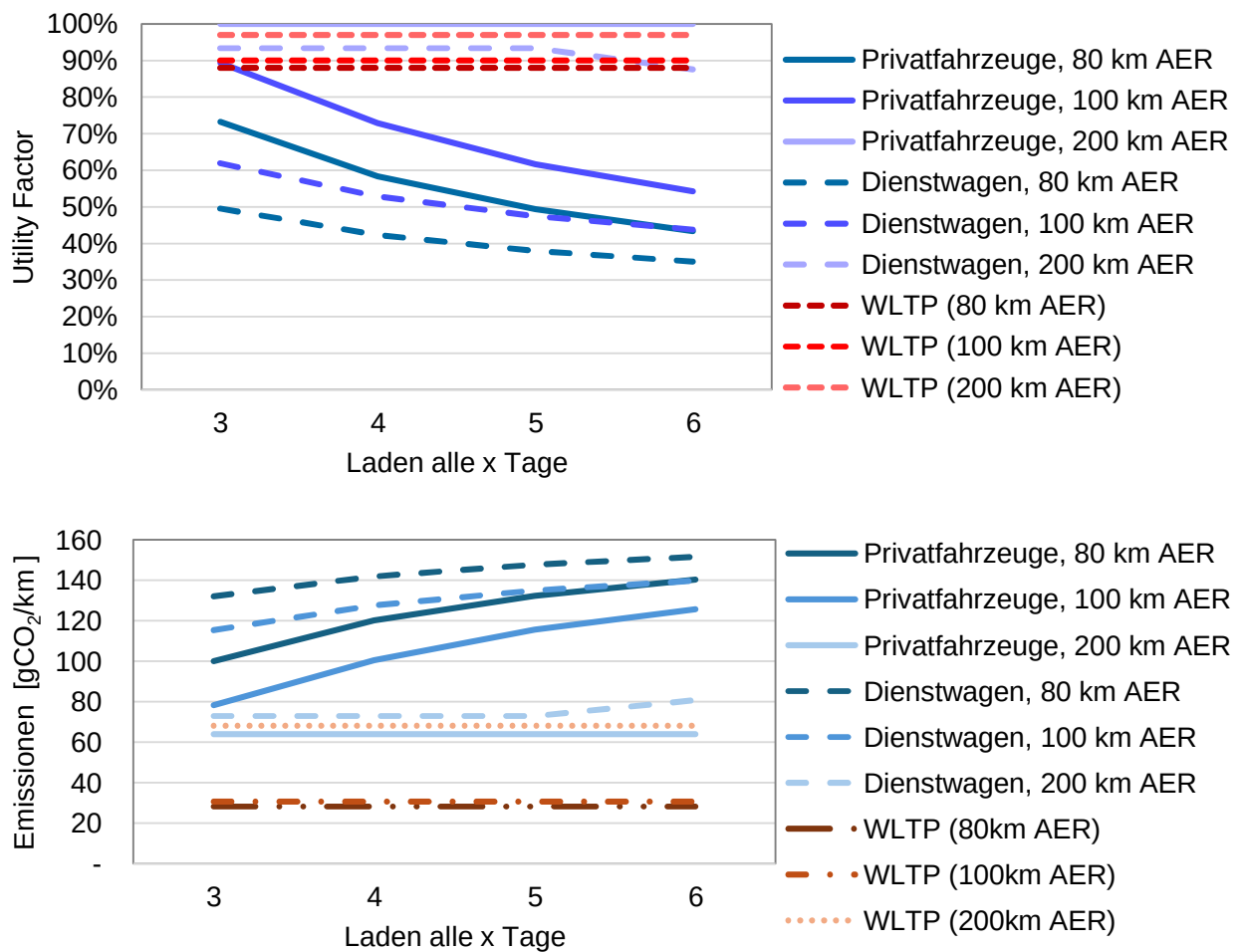


Abbildung 28: Empirischer Utility Factor und CO₂-Emissionen mit unterschiedlichen elektrischen Reichweiten und Laden alle x Tage

Quelle: Eigene Berechnungen

Geofencing

Umsetzbarkeit: Alle neuen Fahrzeuge verfügen über GPS-Navigation und die technischen Voraussetzungen für Geofencing. Die Technologie wird bereits in Pilotprojekten eingesetzt (z.B. in London, Paris für Ultra Low Emission Zones).

Überwachbarkeit: Das Tracking der Fahrzeuge kann rein technisch erfolgen. Eine Überprüfung ist beispielsweise beim Auslesen der OBFCM-Daten denkbar, erfordert aber ein hohes Maß an Daten und Informationen.

Herausforderungen

- Eine EU-weit einheitliche Definition von Geofencing-Zonen, in denen ausschließlich elektrisch gefahren werden darf, ist dann notwendig.
- Kontinuierliche Aktualisierungen der Zonen-Definitionen sind erforderlich.
- Rechtliche Fragen sind zu klären bei Ausfällen oder falscher Zonenerkennung.

- Das Tracking von Fahrzeugbewegungen wirft Datenschutzfragen auf.
- Haftungsfragen bei einem technischen Versagen des Systems müssen geklärt werden.
- Geofencing kann zwar lokale Emissionen senken, aber muss nicht zwangsläufig zu einer Erhöhung des Fahrens im CD-Mode führen. Es ist demnach keine eindeutige Option zur Senkung der CO₂-Emissionen.

Vorteile

- In urbanen Zonen wird erzwungenermaßen elektrisch gefahren
- Studien aus London zeigen Compliance-Raten von >90% bei technischer Durchsetzung
- Effekt besonders groß bei urbanen Vielfahrern (Taxis, Lieferdienste)

Nachteile

- Nur wirksam für Fahrten in definierten Zonen (Pendelstrecken, Lange Fahrten werden nicht betrachtet)
- Viele PHEV verfügen dafür extra über einen Charge-Increasing-Mode mit dem Nutzer vor Einfahrt in Nullemissionszonen mit dem Verbrennungsmotor die Batterie nachladen können. D.h. ein zusätzliches Laden des Fahrzeugs an der Steckdose ist nicht garantiert durch Geofencing und gerade Dienstwagen, die für Strom aber nicht für Benzin zahlen müssen, könnten dies nutzen. Dies könnte also auch zu einer Erhöhung des Kraftstoffverbrauchs und Emissionen führen.
- Außerhalb der Zonen keine Wirkung
- Nutzer könnten strategisch Routen anpassen, um Zonen zu umfahren
- Batteriekapazität muss für Zonenquerungen ausreichen (sonst Verbrenner-Start nötig)

Mögliche Auswirkungen: Hier ist eine direkte Abschätzung schwer möglich, gegebenenfalls ist die Wirkung auf den Kraftstoffverbrauch aufgrund des Vorhaltens der elektrischen Fahrleistung für Stadtfahrten und von Umfahrungen des Geofencing aber sogar negativ, auch wenn lokal (Schadstoff-)Emissionen gesenkt werden können. Von einer Einsparung von CO₂-Emissionen ist daher nicht auszugehen.

Display-Transparenz

Umsetzbarkeit/Überwachbarkeit: Ein Software-Update ist für die meisten Systeme ausreichend und keine Hardware-Änderungen sind nicht notwendig. Einige Hersteller bieten solche Features bereits an.

Herausforderungen

- Die Verhaltensforschung zeigt, dass reine Information nur gering wirksam ist. Verhaltenspsychologische Studien zeigen, dass reine Information ohne finanzielle Anreize oder Verpflichtungen nur marginale Verhaltensänderungen bewirkt. Meta-Analysen zu Energy-Feedback

zeigen durchschnittliche Einsparungen von 5-10% in Haushalten (Agarwal et al. 2023) und 3 – 5 % im Mobilitätsbereich (Tulusan et al. 2012, Stillwater et al. 2017).

- Weiter wären EU-weit einheitliche Metriken und Darstellungen sinnvoll, bedürfen aber einer langen Abstimmung.
- Insbesondere die Vergleiche mit anderen Nutzern erfordern aggregierte Datenverarbeitung zur Wahrung der Persönlichkeitsrechte.

Vorteile

- Sehr einfache Umsetzung
- Lerneffekte und Verhaltensanpassungen sind möglich

Nachteile

- Wirkung rein informatorischer Maßnahmen sind sehr begrenzt
- Einheitliche Darstellung über Hersteller hinweg schwierig
- Keine Überprüfung der Wirksamkeit der Maßnahme möglich

Mögliche Auswirkungen

Eine Einführung könnte ggf. bei der Sensibilisierung von Nutzern unterstützen, als alleinige Maßnahme wäre sie aber keinesfalls ausreichend.

Fazit zu den Maßnahmen zur Erhöhung des Utility Factors

Die vorgeschlagenen Maßnahmen sind als ergänzende Instrumente grundsätzlich sinnvoll, können aber aus unserer Sicht eine realitätsnahe Abbildung des Utility Factors in der Regulierung keinesfalls ersetzen. Den meisten der vorgeschlagenen Maßnahmen stehen zudem eine Reihe von Hürden gegenüber.

Beim Geofencing liegen diese vor allem in der regulatorischen Komplexität und der Aktualität von Geofencing-Zonen. Sofern die Fahrzeuge nicht überwiegend in der Stadt gefahren werden, ist der Effekt dieser Maßnahme zwangsläufig überschaubar oder sogar in Summe negativ. Eine Einsparung ist daher nicht anzunehmen.

Das Inducement ist stark abhängig von Infrastrukturausbau und Ladepreisen, aber auch von der gewählten Nachladedistanz. Wird diese zu groß gewählt, ist der Effekt sehr überschaubar, bei kleinen Werten sind lange Fahrten kaum mehr machbar, wofür PHEV ursprünglich konzipiert wurden. Sinnvoller wäre hier eher auf eine erhöhte Ladehäufigkeit (täglich oder alle zwei Tage) zu setzen.

Die Display-Transparenz ist eine No-Regret-Option, die per Software-Update einfach umzusetzen wäre. Legt man Studien zu informatorischen Maßnahmen zu Grunde, ist ihre Wirkung vermutlich jedoch sehr überschaubar (maximal 3-5% Verbesserung) und nur gemeinsam mit anderen Maßnahmen sinnvoll.

In Abbildung 29 stellen wir diese Emissionen der einzelnen Berechnungen nochmal gegenüber. Im Mittel stießen PHEV nach Realmessungen 147 g CO₂/km aus (EEA 2023). Dies ist etwa fünf Mal so hoch wie die Emissionen nach WLTP mit rund 30 g CO₂/km. Über die Anpassungen an der Regulierung soll diese Lücke geschlossen werden, so dass die Emissionen dort dann (bei mittleren elektrischen Reichweiten von 100km) bei 53 g CO₂/km (ab 2025) und 73 g CO₂/km (ab 2027) lägen. Auch

dann ist man noch einen Faktor 2 von den Realemissionen entfernt. Selbst wenn die Unterschiede in Real- und Nominalverbrauch eingerechnet würden, wäre die Diskrepanz eklatant.

Daran könnten auch die Vorschläge des VDA (in grün und rot) nur bedingt etwas ändern. Bei einem erzwungenen Laden alle 500 km, lägen die Emissionen etwa 2-3 g CO₂/km unter den heute aktuellen Emissionen. Auch die Ersparnis durch Display-Transparenz ist mit 3-5% eher vernachlässigbar. Hierbei sei nochmals angemerkt, dass man aufgrund des mittleren CD-Mode-Verbrauchs von 2,7 Liter Kraftstoff pro 100 Kilometer nur mit sehr hohen Anteilen von Fahrten im CD-Mode mit in die Regionen des adaptierten Vorschlags für 2027 kommt.¹³

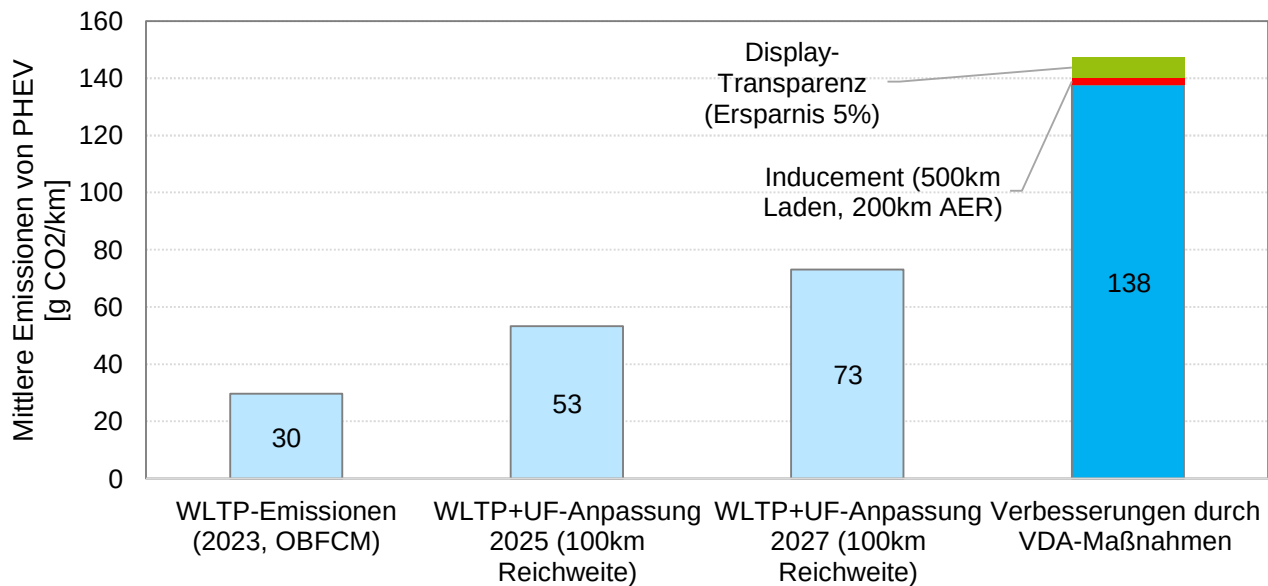


Abbildung 29: Vergleich der mittleren Emissionen von PHEV gemäß Regulierung, Realemissionen und Optionen zur Reduktion durch den VDA

Quelle: Eigene Berechnungen

¹³ Bei UF's von 88% bei 200 km elektrischer Reichweite, 90% bei 100 km und 97% bei 80 km elektrischer Reichweite müssten die Fahrzeuge nach nahezu jeder vollständigen Entladung wieder geladen werden, um mit der Regulierung von 2027 konform zu sein.

3.4. Szenario-Modellierung der CO₂-Emissionswirkungen

3.4.1. Szenarioausgestaltung

Die Modellierung der Szenarien zu unterschiedlichen Annahmen des realen und des WLTP-Verbrauchs von PHEV erfolgt mithilfe des Modells TEMPS (Transport Emissions and Policy Scenarios).¹⁴ Die Szenarien samt Rahmendaten und Instrumenten basieren auf dem Projektionsbericht 2025 mit leichten Anpassungen: einer Aktualisierung der Neuzulassungszahlen für 2024, einer Anpassung der Flottenzielwerte auf den Stand Anfang 2025 (Averaging 2025-2027) und einer Aktualisierung des realen Utility Factors und der realen Energieverbräuche für Plug-In-Hybride basierend auf den Analysen in (Plötz & Gnann 2025).

In TEMPS wird für PHEV entsprechend der vorigen Analysen ein Utility Factor für die Regulierung (UF_{reg}) und einer für den realen Verbrauch (UF_{real}) definiert. Für alle Szenarien wird der reale Utility Factor auf Grundlage von ICCT (2022) und Plötz et al. (2022) sowie den Energieverbräuchen aus Plötz et al. (2025) hergeleitet; der für die Regulierung berücksichtigte Utility Factor unterscheidet sich in den unten genannten Szenarien entsprechend der jeweiligen Szenariodefinition. In der Modellierung wird in der realen Fahrzeugnutzung und für das reale Ladeverhalten zudem zwischen privaten und gewerblichen Fahrzeugen unterschieden. Die Batteriereichweite der PHEV wird anhand von Auswertungen von EU-Monitoring-Daten für die historischen Daten bis zum Jahr 2024 aktualisiert. Bis 2030 wird außerdem angenommen, dass die Batteriereichweiten auf 80 km (2024: 63 km) bei kleinen, 90 km (2024: 67 km) bei mittleren und 100 km (2024: 82 km) bei großen Fahrzeugen ansteigen. Die Szenarien sind wie in Tabelle 7 parametrisiert.

Tabelle 7: Beschreibung und Parametrisierung der Szenarien für die Bestimmung der CO₂-Emissionswirkung der verschiedenen Ausgestaltungsoptionen zum Umgang mit PHEV

Szenario	Beschreibung	Parametrisierung
Szenario 0 (Referenz – S0)	Umsetzung geplanter UF-Anpassungen (ab 2025: $d = 2.200$ km, ab 2027: $d = 4.260$ km)	UF_{reg} für alle neuen PHEV im Modell entsprechend den Anpassungen in den Jahren 2025 und 2027
Szenario 1a (S1a)	Aussetzung der UF-Anpassungen der Jahre 2025 & 2027	UF_{reg} im Modell entsprechend der Ausgestaltung vor 2025 ($d=800$ km)
Szenario 1b (S1b)	Aussetzung der UF-Anpassungen der Jahre 2025 & 2027 und Abbildung des Effekts von Geofencing und Inducement ab 2027	UF_{reg} im Modell entsprechend der Ausgestaltung vor 2025 ($d=800$ km). Entsprechend der Analysen in den vorigen Kapiteln wird für die Wirkung des Effekts der weiteren Maßnahmen wie Geofencing und Inducement ab dem Jahr 2027 eine 5 %-ige Verbesserung der Realverbräuche gegenüber dem Szenario S1a angenommen.
Szenario 2 (S2)	Aussetzung der UF-Anpassungen des Jahres 2027 (ab 2025: $d = 2.220$ km)	UF_{reg} für alle neuen PHEV im Modell entsprechend den Anpassungen in den Jahren 2025

Quelle: Eigene Annahmen für die Ausgestaltung

¹⁴ Vgl. <https://thg-projektionen2025-daten-modell-dokumentation-788cd5.usercontent.opencode.de/Modell/temps/>

3.4.2. Ergebnisse

Zentrale Ergebnisse der Modellierung sind die Neuzulassungsstruktur der Pkw und die Wirkung auf die THG-Emissionen im Straßenverkehr.

Im Vergleich der Szenarien ist der Neuzulassungsanteil der PHEV im Referenzszenario S0 bis zum Jahr 2030 durchgehend am höchsten (rund 10 %) und der Anteil an rein batterieelektrischen Pkw (BEV) ist ebenfalls vergleichsweise hoch (siehe Abbildung 30). In Szenario S2 ist angenommen, dass die Anpassung des Utility Factors nur im Jahr 2025 stattfindet und für das Jahr 2027 ausgesetzt ist. Entsprechend gibt es erst ab dem Jahr 2027 Abweichungen zur Referenz S0. Im Vergleich zur Referenz S0 liegen die Neuzulassungsanteile der PHEV bis zum Jahr 2030 leicht niedriger. Dies wird ausgeglichen mit minimal höheren Neuzulassungsanteilen von BEV; vor allem aber durch höhere Neuzulassungsanteile verbrennungsmotorischer Pkw (ICEV). Die Unterschiede in der Neuzulassungsstruktur ergeben sich dabei aus der Modellogik von TEMPS, in der für die Einhaltung der Flottenzielwerte auf Basis der hinterlegten Kostenkurven eine Kostenoptimierung aus Sicht der Fahrzeughersteller durchgeführt wird. Ab dem Jahr 2027 besitzen die PHEV im Szenario S2 zwar niedrigere spezifische CO₂-Emissionen in der Regulierung, so dass mit mehr PHEV zum Beispiel auf Kosten von BEV die Flottenzielwerte eingehalten werden können. Die Kostenoptimierung der Modellierung wählt in Verbindung mit den Nachfrageelementen von TEMPS für die Zieleinhaltung der Flottenzielwerte jedoch mehr ICEV und BEV aus, da sie im Vergleich zu den PHEV zu niedrigeren Produktionskosten in der Gesamtheit führen.

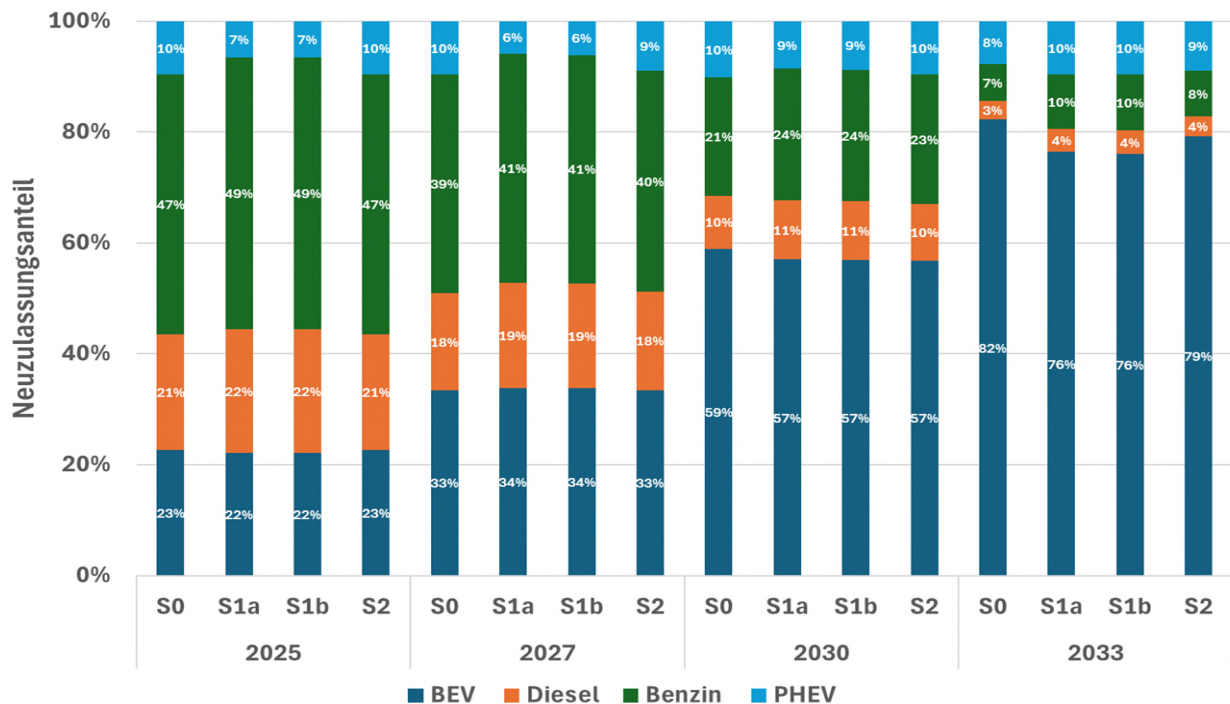


Abbildung 30: Vergleich der Pkw-Neuzulassungsstruktur für ausgewählte Jahre

Quelle: Eigene Berechnungen

In den Szenarien S1a und S1b ist bis zum Jahr 2030 ein noch stärkerer Rückgang der PHEV-Neuzulassungen zu beobachten. Das Ausbleiben der beiden Anpassungsschritte der Jahre 2025 und 2027 des Utility Factors bewirkt, dass PHEV mit deutlich niedrigeren WLTP-Emissionen in den Flottenzielwerten angerechnet werden als in S0 und in Folge die CO₂-Emissionsstandards mit einem deutlich höheren ICEV-Anteil eingehalten werden. Neben den PHEV sinkt in den Szenarien 1a und 1b auch der Neuzulassungsanteil der BEV. Zwischen den Szenarien 1a und 1b ergeben sich in der

Modellierung aufgrund der geringen unterschiedlichen realen Verbräuche und dadurch sehr geringen Unterschiede der Nutzungskosten der PHEV nur minimale Unterschiede. Auch in diesen Szenarien ist die Modellogik der Kostenoptimierung aus Sicht der Hersteller der Grund für die Wirkeffekte und den niedrigeren Neuzulassungsanteil der PHEV.

Nach dem Jahr 2030 ändern sich die Effekte zwischen den Szenarien durch die unterschiedliche regulative Berücksichtigung der PHEV. Dies hängt mit der für die CO₂-Emissionsstandards in der Modellierung angenommene Mindestentwicklung der durchschnittlichen CO₂-Emissionen der Neuzulassungen und dem damit kontinuierlich steigenden Ambitionsniveau der CO₂-Emissionsminderung bei den Neuzulassungen zusammen¹⁵. Da PHEV im Referenzszenario S0 im Vergleich zu den Szenarien 1a, 1b und 2 höhere WLTP-Emissionen aufweisen, sind bei dem nach 2030 angenommenen, kontinuierlich steigenden Ambitionsniveau der Regulierung im Vergleich zu den anderen Szenarien mehr BEV notwendig, um die Vorgaben der Flottenzielwerte einzuhalten. Dementsprechend weist Szenario S0 die höchsten BEV-Neuzulassungsanteile auf, während die Szenarien 1a und 1b im Vergleich der Szenarien die höchsten Neuzulassungsanteile von PHEV besitzen. Wie im Zeitraum bis zum Jahr 2030 liegt das Szenario S2 in der Mitte dieser Szenarien.

In Abbildung 31 sind die kumulierten Mehremissionen der Szenarien S1a, S1b und S2 im Vergleich zur Referenz S0 dargestellt. Die Szenarien S1a und S1b weisen durch die ausbleibenden Anpassungsschritte des Utility Factors und die damit einhergehenden höheren Neuzulassungsanteile von stärker emittierenden Pkw über den gesamten Zeitraum bis einschließlich zum Jahr 2034 die höchsten Mehremissionen auf. Bis zum Jahr 2050 kumulieren sich die Mehremissionen auf 23,1 (S1b) bzw. 25,2 (S1a) Mt CO₂-Äq. Der Unterschied zwischen diesen beiden Szenarien ergibt sich im Wesentlichen aus den unterschiedlichen Realemissionen der PHEV, die in Szenario 1b durch die angenommene Wirkung des Geofencing und Inducements geringfügig niedriger sind als in Szenario 1a. Szenario 2, welches die Aussetzung der Anpassung des Utility Factors im Jahr 2027 berücksichtigt, weist einen geringeren THG-Emissionsanstieg gegenüber der Referenz S0 auf. Bis zum Jahr 2050 sind die THG-Emissionen kumuliert um 7Mt CO₂-Äq. höher als in der Referenz S0. In diesem Fall entstehen die Mehremissionen vor allem durch die unterschiedliche Neuzulassungsstruktur zwischen Szenario 2 und Szenario S0 im Zeitraum nach dem Jahr 2030.

¹⁵ In der Modellierung der Projektionen 2025 ist angenommen, dass die maximalen, spezifischen durchschnittlichen CO₂-Emissionen der Neuzulassungen zwischen dem Jahr 2030 und 2035 kontinuierlich linear absinken.

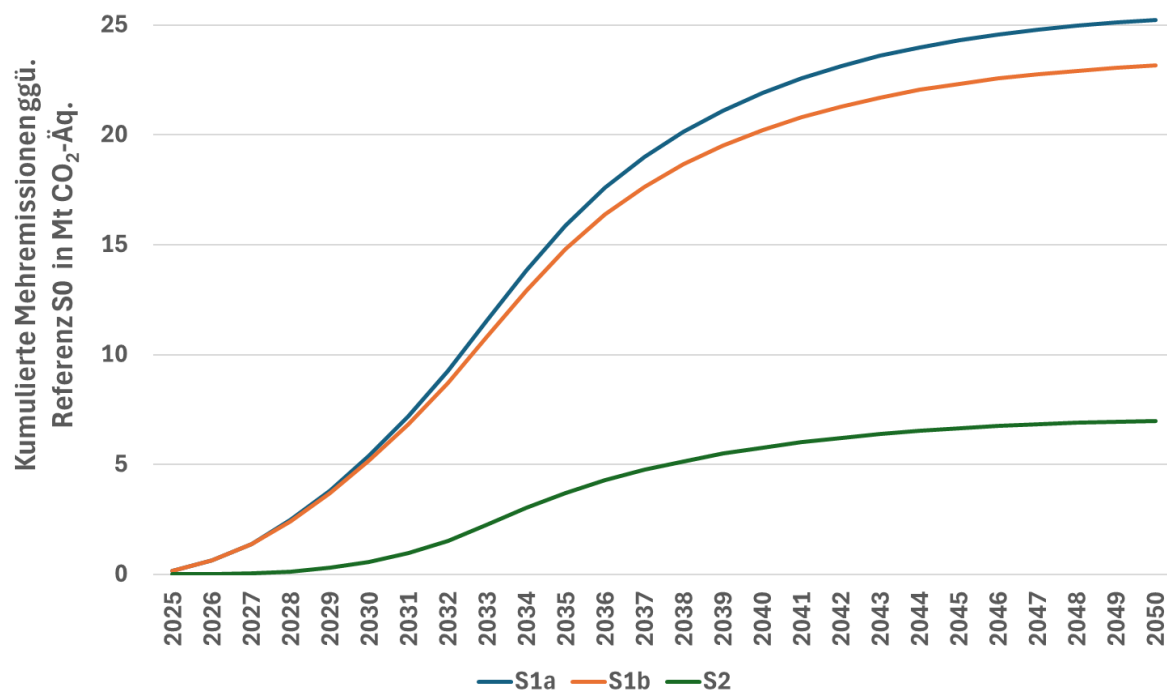


Abbildung 31: Kumulierte THG-Mehremissionen gegenüber der Referenz S0

Quelle: Eigene Berechnungen

Für die THG-Emissionsfreisetzung ist zu beachten, dass sich die Modellierung mit dem Modell TEMPS auf die gültigen CO₂-Flottenzielwerte für Pkw zum Stand der Bearbeitung beziehen, so dass ab dem Jahr 2035 „nur“ noch emissionsfreie neue Pkw zugelassen werden. Die zusätzlichen THG-Emissionen gegenüber dem Referenzszenario S0 wären entsprechend, wenn angepasste CO₂-Flottenzielwerte hinterlegt werden, wie sie im „Automotive Package“ vom 16.12.2025 von der EU-Kommission vorgeschlagen wurden.

3.5. Regulatorische Anforderungen für Low-Emission-PHEV

3.5.1. Ausgangslage und Problemstellung

Plug-in-Hybridfahrzeuge (PHEV) werden teilweise als Brückentechnologie behandelt und profitieren von günstigen Anrechnungen bei den CO₂-Flottenzielen in der europäischen Regulierung. Die Typgenehmigung basiert auf Annahmen über hohe elektrische Fahranteile, die sich in der Praxis jedoch nicht bestätigen. Aktuelle OBFCM-Daten zeigen, dass die realen Kraftstoffverbräuche von PHEV im Mittel bei etwa 5,8–6,1 l/100 km liegen, was CO₂-Emissionen von rund 140 g CO₂/km entspricht. Selbst unter optimalen Ladebedingungen (= ausschließliche Fahrt im Charge-depleting-Mode) erreichen heutige PHEV keine wirklich niedrigen Emissionen: Die Modelle liegen im Mittel bei etwa 2,8 l/100 km bzw. 68 g CO₂/km – weit über klimaneutraler Mobilität

Aus klimapolitischer Perspektive bestehen erhebliche Bedenken gegen eine Zulassung von PHEV über 2035 hinaus. PHEV, die nach 2035 zugelassen werden, verbleiben etwa 12 xxJahre im Fahrzeugbestand und emittieren über diese Zeit kumulativ erhebliche Mengen CO₂. Bei aktuellen Realemissionen von etwa 140 g CO₂/km entspricht dies über die Lebensdauer etwa 17 Tonnen CO₂ pro Fahrzeug. Die EU hat sich zu Klimaneutralität bis 2050 verpflichtet, und nach 2035 zugelassene PHEV würden sich 2050 bei einer angenommenen Fahrzeuglebensdauer von 15 Jahren noch im Bestand befinden. Sie würden weiterhin fossile CO₂-Emissionen verursachen und das Klimaneutralitätsziel gefährden.

Vergleicht man das 2035-Ziel mit den für das Pariser Abkommen kompatiblen THG-Emissionsbudgets für den Verkehrssektor, zeigt sich zudem, dass der Ausstieg aus Verbrennungsmotoren eher früher als später erfolgen müsste (vgl. Plötz et al. 2023). Eine Aufweichung des 2035-Ziels würde die Zielerreichung weiter erschweren. Dennoch werden international verschiedene Ansätze verfolgt, die eine begrenzte Rolle für hocheffiziente PHEV vorsehen. Diese Ansätze werden im Folgenden als Grundlage für die Entwicklung möglicher regulatorischer Elemente herangezogen.

Grundsätzlich erfüllt die Berechnung der Typgenehmigungsverbräuche von PHEV mindestens zwei Zwecke. Zum einen für die Angabe von typischen Verbrauchswerten nach der Homologation als Informationen für Käufer bspw. im Rahmen der Car-Labeling-Directive und Ihren nationalen Umsetzungen. Zum anderen werden die gemischten Verbräuche von PHEV als CO₂-Emissionen pro km in die Mittelwertbildung der Flottenemissionen eines jeden Herstellers aufgenommen. Sowohl für die Typgenehmigungswerte als auch die Realwerte gelten daher für Kraftstoffverbrauch und CO₂-Emissionen näherungsweise die folgende Gleichung:¹⁶

$$\text{Verbrauch}_{\text{gemischt}} = \text{Verbrauch}_{\text{CD-Mode}} * \text{UF} + \text{Verbrauch}_{\text{CS-Mode}} * (1 - \text{UF}) \quad (1)$$

Der gemischte Verbrauch und die gemischten Emissionen pro km in der Typgenehmigung und real sind die UF gewichtete Mischung aus Charge-Depleting-Mode- und Charge-Sustaining-Mode-Verbrauch. Ursprünglich ging man vmtl. davon aus, dass der CD-Mode fast nur elektrisch wäre und der UF wurde daher auch oft als elektrischer Fahranteil aufgefasst. Der reale elektrische Fahranteil der knapp eine Million PHEV in den OBFCM-Daten liegt bei 42% (CD-Modus gesamt) beziehungsweise 31% (CD-Modus Motor aus) und im Mittel der Fahrzeugmodelle ist der Verbrennungsmotor nur 63% der CD-Mode-km aus, so dass über ein Drittel der CD-mode-KM mit Verbrennungsmotor angefahren wird.

¹⁶ Tatsächlich werden UF für die einzelnen Phasen angewendet, aber im Wesentlichen läuft die Berechnung auf die hier gezeigte Logik hinaus. Die Gleichung dient hier vor allem zu Erläuterung, die genaue Vorgehensweise in der Regulierung ist in Kap. 1.2 beschrieben.

Für realitätsnahe offizielle Werte bieten sich mehrere Optionen an. In vielen Studien und in den OBFCM-Daten hat sich nun eine erhebliche Diskrepanz zwischen dem offiziellen und realen gemischten Verbrauch gezeigt (jeweils linke Seite der Gleichung). Weiterhin haben die OBFCM-Daten gezeigt, dass alle drei Variablen der rechten Seite der Gleichung in der Realität deutlich von den offiziellen Typgenehmigungswerten abweichen. Der CD-Mode hat je nach Hersteller sehr hohe Fahranteile mit Verbrennungsmotor an und weicht damit im Mittel substanziell von einem rein elektrischen Betrieb ab. Der Umfang der Abweichung variiert stark zwischen den Herstellern, aber im Mittel zeigt der CD-Mode einen Kraftstoffverbrauch von 2,7 l/100km bzw. ca. 70 g CO₂/km.

Um die Differenz zwischen offiziellen und realen Werten zu schließen, können auf der rechten Seite der Gleichung jede einzelne Variable oder auch nur vor allem der UF angepasst werden. Es könnte also die Bestimmung der Verbräuche in CD- und CS-Mode korrigiert werden und / oder der UF. Eine Anpassung der Testverfahren und Definitionen von CD- und CS-Mode wäre aufwändig und würde erhebliche Änderungen im internationalen Regelwerk zur Messung von Fahrzeugverbräuchen erfordern. Daher haben sich bislang Anpassungsbemühungen auf den UF konzentriert: Durch Änderung einer Zahl in der UF-Formel lässt sich die Lücke zwischen Real- und Nominalemmissionen reduzieren.

Da PHEV offiziell im Mittel nur ca. 30 g CO₂/km emittieren zeigt sich direkt an obiger Formel, dass eine Anpassung allein, die Lücke zwischen Real- und Nominalemmissionen reduzieren aber niemals schließen kann. Da der kleinstmögliche UF = 0 ist, wäre der kleinstmögliche Nominalverbrauch gleich dem CD-Mode Verbrauch.

3.5.2. Range-Extender und Internationale Beispiele für Regulierung

Range-Extender-Konzepte unterscheiden sich grundlegend von konventionellen PHEV. Sie verfügen über einen primär elektrischen Antrieb mit großer Batterie, typischerweise über 20 kWh nutzbare Kapazität (bspw. Opel Ampera, BMW i3 REX, Leapmotor C10 REEV). Der Verbrennungsmotor dient ausschließlich als Generator zur Batterieladung und nicht als Primärtrieb. Das Fahrzeug ist auf einen sehr hohen elektrischen Fahranteil von über 90% optimiert, und der Verbrennungsmotor ist kleiner dimensioniert. Das Fahren im Verbrennermodus (CS-Modus) ist somit bzgl. der erzielbaren Dynamik deutlich limitiert und der CS-Modus damit nur für seltene Langstreckenfahrten vorgesehen. Die Electric-First-Logik ist technisch implementiert, bspw. durch Verbrennerstart nur bei leerer Batterie.

Eine Regulierung mit Obergrenzen bzgl. der Realemissionen von beispielsweise 10 g CO₂/km zielt daher faktisch auf Range-Extender-Fahrzeuge ab und nicht auf konventionelle PHEV. Nur durch grundlegend andere Fahrzeugkonzepte mit sehr hohen elektrischen Fahranteilen sind solch niedrige Emissionswerte überhaupt erreichbar. Dies hat weitreichende Implikationen für die technologische Entwicklung und die Investitionsplanung der Hersteller.

Kalifornien erlaubt PHEV als "Transitional Zero Emission Vehicles" (TZEV) im Rahmen des ZEV-Mandats mit einer Begrenzung auf maximal 10% der ZEV-Compliance-Verpflichtung. Die Mindestanforderung liegt bei 50 Meilen (etwa 80 km) elektrischer Reichweite, wobei die Anforderungen schrittweise verschärft werden, und der zulässige Anteil reduziert wird. Der Trend geht klar in Richtung vollständiger Ablösung durch BEV.

China erlaubt Extended Range Electric Vehicles (EREVs) im Rahmen der New Energy Vehicle (NEV) Regulierung. Diese zeichnen sich durch sehr hohe elektrische Reichweiten aus, typischerweise über 100 km und häufig über 150 km. Die chinesische Regulierung verwendet eine konservative Utility-Faktor-Kurve, die bei 87,6% sättigt und nicht bei 100% wie in Europa. Der Markt für

EREVs wächst stark mit über einer Million Verkäufen im Jahr 2024. Technologisch sind diese Fahrzeuge oft als Range-Extender-Konzepte mit Electric-First-Logik ausgelegt.

3.5.3. Elemente eines möglichen Regulierungsrahmens

Basierend auf den internationalen Erfahrungen und unter Berücksichtigung der empirischen OBFCM-Daten werden im Folgenden Kernelemente für einen möglichen Regulierungsrahmen entwickelt. Dieser könnte die Neuzulassung von PHEV unter klaren Voraussetzungen zeitlich begrenzt auch nach dem Jahr 2035 ermöglichen. Die konkreten Zahlenwerte sind als Orientierung zu verstehen und unterliegen politischer Abwägung.

1. Begrenzter Marktanteil

Um zu verhindern, dass PHEV die Transformation zu emissionsfreier Mobilität verzögern und um das Klimaneutralitätsziel 2050 nicht zu gefährden, sollte die Zulassung von PHEV nach 2035 strikt begrenzt sein und in einem separaten System jenseits der bestehenden Flottenzielwerte geregelt werden. Ein maximaler Anteil von 5 bis 10 % der Herstellerflotte an Neuzulassungen mit einer zeitlichen Befristung bis maximal Ende der 2030er Jahre (2038 bis 2040) erscheint angemessen. Die Ausgestaltung sollte degressiv erfolgen, beispielsweise mit 10% im Jahr 2036, 7 % im Jahr 2037, 5 % im Jahr 2038, 2 % im Jahr 2039 und 0 % ab 2040. Diese Größenordnung ermöglicht Flexibilität für spezifische Nutzergruppen, etwa solche ohne Lademöglichkeit oder mit extremen Langstreckenanforderungen, orientiert sich am California ZEV-Mandat mit maximal 10% Anteil und signalisiert durch die Degression eine klare Übergangsphase ohne dauerhafte Alternative zu emissionsfreien Fahrzeugen. Die zeitliche Befristung sichert zudem die Kompatibilität mit dem 2050-Klimaneutralitätsziel der EU.

2. Technische Mindestanforderungen

Nur Fahrzeuge mit überwiegend elektrischem Betrieb sollten zugelassen werden. Eine elektrische Mindestreichweite von mindestens 150 km nach WLTP ist notwendig, da diese Reichweite etwa 80 bis 90 % der täglichen Fahrten abdeckt. Das Fahrzeug muss im rein elektrischen Betrieb mindestens 130 km/h erreichen können, um Autobahnfähigkeit im E-Modus zu gewährleisten und häufiges Motorstarten auf Langstrecken zu verhindern. Eine Electric-First-Logik muss technisch implementiert sein, sodass der Verbrennungsmotor nur bei expliziter Notwendigkeit wie hoher Leistungsanforderung oder leerer Batterie startet. Diese Anforderungen führen faktisch zu Range-Extender-Konzepten, da konventionelle PHEV diese Kombination aus Reichweite, Leistung und Emissionen nicht erreichen. Sie stellen sicher, dass nur Fahrzeuge zugelassen werden, die strukturell für sehr hohe elektrische Fahranteile ausgelegt sind.

3. Obergrenze Realemissionen

Ein wichtiges Element eines wirksamen Regulierungsrahmens könnte eine Obergrenze für Realemissionen sein (vgl. Plötz & Tal, 2025). Entscheidend ist nicht die technische Auslegung allein, sondern die tatsächlich erreichte Emissionsreduktion im Realbetrieb. Ein Cap auf Basis von OBFCM-Daten schließt die Lücke zwischen Labor und Realität und stellt einen Paradigmenwechsel in der Fahrzeugregulierung dar. Ein Wert von maximal bspw. 10 g CO₂/km im realen Fahrbetrieb erscheint ambitioniert aber unter optimalen Bedingungen erreichbar und entspräche Range-Extender-Konzepten. Die Messung sollte über OBFCM-Daten erfolgen. Die Compliance-Bewertung würde nach ca. zwei Jahren erfolgen und als arithmetischer Mittelwert aller vom Hersteller verkauften Post-2035-PHEV berechnet werden.

Ein Wert von 10 g CO₂/km entspricht etwa 0,4 Liter Kraftstoff pro 100 km. Bei einem typischen CS-Verbrauch von 7 l/100 km erfordert dies einen elektrischen Fahranteil von etwa 97 %. Alternative Caps zur Diskussion wären 20 g CO₂/km (erforderlicher UF etwa 94 %, deutliche Verbesserung aber möglicherweise zu wenig ambitioniert) oder 50 g CO₂/km (erforderlicher UF etwa 85 %, kaum Verbesserung gegenüber Status quo und klimapolitisch unzureichend). Der Wert von 10 g CO₂/km stellt einen angemessenen Kompromiss dar zwischen Ambitionsniveau und technischer Realisierbarkeit bei optimalen Rahmenbedingungen.

4. Review und Revision

Kontinuierliche Überprüfung und öffentliche Transparenz sind zentral für die Glaubwürdigkeit und Anpassungsfähigkeit der Regulierung. Eine jährliche Publikation aggregierter OBFCM-Daten pro Marke und Modell sollte erfolgen, mit Metriken wie Real-World CO₂-Emissionen, elektrischem Fahranteil und Ladehäufigkeit. Die Daten sollten weiterhin öffentlich zugänglich über die EEA-Datenbank in maschinenlesbarem Format bereitgestellt werden. Nach ca. zwei Jahren sollte eine erste Evaluation der Wirksamkeit erfolgen. Die Bewertungskriterien sollten umfassen, ob das 10 g CO₂/km Cap im Durchschnitt erreicht wird, wie sich der PHEV-Marktanteil entwickelt, welche Modelle und Konzepte erfolgreich sind und ob unerwünschte Nebeneffekte oder Umgehungsstrategien auftreten.

Fazit

Die Entwicklung eines Regulierungsrahmens für Low-Emission-PHEV zeigt, dass eine technisch und klimapolitisch sinnvolle Ausgestaltung möglich ist, aber erhebliche Herausforderungen mit sich bringt. Die fünf entwickelten Kernelemente, bestehend aus begrenztem Marktanteil, technischen Mindestanforderungen, Realemissions-Obergrenze sowie Transparenz und Monitoring, bilden ein kohärentes System. Dieses System orientiert sich an internationalen Vorbildern und nutzt die Verfügbarkeit von OBFCM-Daten für einen Paradigmenwechsel hin zu realemissionsbasierter Regulierung. Die Analyse macht jedoch deutlich, dass eine solche Regulierung faktisch auf Range-Extender-Konzepte abzielt und nicht auf konventionelle PHEV. Aktuelle PHEV-Technologie kann die erforderlichen niedrigen Realemissionen strukturell nicht erreichen. Dies erfordert grundlegende Neukonzeption der Fahrzeuge durch die Hersteller mit entsprechendem Investitionsbedarf.

Die primäre Empfehlung lautet daher, an der konsequenten Umsetzung des 2035-Ziels ohne Ausnahmen festzuhalten. Falls eine befristete und begrenzte Ausnahme für PHEV unvermeidbar erscheint, bieten die hier entwickelten Elemente einen Rahmen, der sicherstellt, dass nur Fahrzeuge mit nachweislich sehr niedrigen Realemissionen zugelassen werden. Die Ausgestaltung muss dann jedoch konsequent sein, mit ambitionierten Realemissions-Caps, wirksamen Sanktionen und klarer zeitlicher Befristung bis maximal Ende der 2030er Jahre. Entscheidend ist, dass jede Ausnahmeregelung nicht als dauerhafte Alternative zu emissionsfreier Mobilität missverstanden wird, sondern als eng begrenzte Übergangsoption, die den fundamentalen Transformationspfad zu Klimaneutralität 2050 nicht gefährdet. Die regulatorischen Elemente müssen so ausgestaltet sein, dass sie Innovation in Richtung höchster Effizienz fördern, aber gleichzeitig verhindern, dass sie zu einer Verzögerung der notwendigen vollständigen Elektrifizierung führen.

Literaturverzeichnis

- Agarwal, R., Garg, M., Tejaswini, D., Garg, V., Srivastava, P., Mathur, J., & Gupta, R. (2023). A review of residential energy feedback studies. *Energy and buildings*, 290, 113071. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2023.113071>
- Dornoff, J. (2021). Plug-in hybrid vehicle CO₂ emissions: How they are affected by ambient conditions and driver mode selection (p. 57) [White Paper]. ICCT. <https://theicct.org/publications/phev-CO2-emissions-ambient-conditions-dec2021>
- Dornoff, J. (2022). Euro 6e: Changes to the European Union light-duty vehicle type-approval procedure [Policy Briefing]. ICCT. <https://theicct.org/wp-content/uploads/2022/12/euro6e-type-approval-dec22.pdf>
- EC (European Commission) (2023): Commission Regulation (EU) 2023/443 of 8 February 2023 amending Regulation (EU) 2017/1151 as regards the emission type approval procedures for light passenger and commercial vehicles (Text with EEA relevance) <https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2023/443/o>
- EEA (European Environment Agency) (2025): Real-world CO₂ emissions from new cars and vans. Retrieved September 18, 2024, from <https://climate-energy.eea.europa.eu/topics/transport/real-world-emissions/data>
- EEA (European Environmental Agency) (2023): Monitoring of CO₂ emissions from passenger cars Regulation (EU) 2019/631. <https://www.eea.europa.eu/en/datahub/datahubitemview/fa8b1229-3db6-495d-b18e-9c9b3267c02b?activeAccordion=1094576>
- European Commission (2024). Commission Staff Working document—Accompanying the document: Report from the Commission—Commission report under Article 12(3) of Regulation (EU) 2019/631 on the evolution of the real-world CO₂ emissions gap for passenger cars and light commercial vehicles and containing the anonymised and aggregated real-world datasets referred to in Article 12 of Commission Implementing Regulation (EU) 2021/392 (Staff Working Document No. SWD(2024) 59 final). European Commission. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:52024SC0059>
- Förster, H., Repenning, J., Borkowski, K., Braungardt, S., Bürger, V., Cook, V., ... & Bei der Wieden, M. (2025). Treibhausgas-Projektionen 2025 für Deutschland (Projektionsbericht 2025).
- Gnann, T. (2015). *Market diffusion of plug-in electric vehicles and their charging infrastructure*. Stuttgart, Germany: Fraunhofer Verlag. <https://publica.fraunhofer.de/bitstreams/5aabe7b7-4072-4276-af10-e02b85b6d7ad/download>
- Gnann, T., Funke, S., Jakobsson, N., Plötz, P., Sprei, F., & Bennehag, A. (2018). Fast charging infrastructure for electric vehicles: Today's situation and future needs. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 62, 314-329. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2018.03.004>
- Gohlke & Gimbert. (2025). Smoke screen: The growing PHEV emissions scandal. Transport & Environment. https://www.transportenvironment.org/uploads/files/2025_10_PHEV_smoke_screen_report.pdf
- Hardman, S., & Tal, G. (2021). Understanding discontinuance among California's electric vehicle owners. *Nature Energy*, 6(5), 538-545.

ICCT (2025): What's next for China's PHEV market? Blog post September 9, 2025, <https://theicct.org/whats-next-for-chinas-phev-market-sept25/>

MOP (2010). "Mobilitätspanel Deutschland" 1994-2010. Projektbearbeitung durch das Institut für Verkehrswesen der Universität Karlsruhe (TH). Verteilt durch die Clearingstelle Verkehr des DLR-Instituts für Verkehrsforschung: www.clearingstelle-verkehr.de, Karlsruhe, Germany.

Plötz, P., 2014. How to estimate the probability of rare long-distance trips (No. S1/2014). Working Paper Sustainability and Innovation, Fraunhofer Institute for System and Innovation Research (ISI), Karlsruhe, Germany.

Plötz, P., Gnann, T. (2025): Real-world Fuel Consumption and Potential Future Regulation of Plug-In Hybrid Electric Vehicles in Europe – An Empirical Analysis of about one Million Vehicles. Koper-nikus-Projekt Ariadne, Potsdam. <https://doi.org/10.48485/pik.2025.23>

Plötz, P., & Tal, G. (2025): Regulate reality in vehicle emission policy. *Commun Earth Environ* (2025). <https://doi.org/10.1038/s43247-025-03093-4>

Plötz, P., Jakobsson, N., & Sprei, F. (2017). On the distribution of individual daily driving distances. *Transportation research part B: methodological*, 101, 213-227. <https://doi.org/10.1016/j.trb.2017.04.008>

Plötz, P., Link, S., Ringelschwendner, H., Keller, M., Moll, C., Bieker, G., ... & Mock, P. (2022). Real-world usage of plug-in hybrid vehicles in Europe. ICCT White Paper. <https://theicct.org/publication/real-world-phev-use-jun22/>

Plötz, P., Link, S., Ringelschwendner, H., Keller, M., Moll, C., Bieker, G., Dornoff, J., & Mock, P. (2022). Real-world usage of plug-in hybrid vehicles in Europe: A 2022 update on fuel consumption, electric driving, and CO2 emissions. International Council on Clean Transportation. <https://theicct.org/wp-content/uploads/2022/06/real-world-phev-use-jun22-1.pdf>

Plötz, P., Wachsmuth, J., Sprei, F., Gnann, T., Speth, D., Neuner, F., & Link, S. (2023). Greenhouse gas emission budgets and policies for zero-Carbon road transport in Europe. *Climate Policy*, 23(3), 343-354.

Gohlke & Gimbert. (2025). Smoke screen: The growing PHEV emissions scandal. Transport & Environment. https://www.transportenvironment.org/uploads/files/2025_10_PHEV_smoke_screen_report.pdf

Stillwater, T., Kurani, K. S., & Mokhtarian, P. L. (2017). The combined effects of driver attitudes and in-vehicle feedback on fuel economy. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 52, 277-288.; <https://doi.org/10.1016/j.trd.2017.02.013>

Suarez, J., Tansini, A., Ktistakis, M. A., Marin, A. L., Komnos, D., Pavlovic, J., & Fontaras, G. (2025). Towards zero CO2 emissions: Insights from EU vehicle on-board data. *Science of The Total Environment*, 1001. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2025.180454>

Transport & Environment (T&E) (2025). Smoke screen: the growing PHEV emissions scandal. October 2025.

Tulusan, J., Staake, T., & Fleisch, E. (2012). Providing eco-driving feedback to corporate car drivers: what impact does a smartphone application have on their fuel efficiency? In *Proceedings of the 2012 ACM conference on ubiquitous computing* (pp. 212-215). <https://doi.org/10.1145/2370216.2370250>

VDA (2025a): Aussetzen der Verschärfung der PHEV Utility Factor. Positionspapier des Verbands der Automobilindustrie (VDA); Mai 2025.

VDA (2025b): Stärkung des elektrischen Fahranteils von PHEVs und Zukunftsperspektiven Post-2035. Positionspapier des Verbands der Automobilindustrie (VDA); Oktober 2025.

Anhang

Tabelle 8: Detaillierter Vergleich der Pkw-Neuzulassungsstruktur zwischen den Szenarien

Jahr	Szenario	BEV	PHEV	Diesel	Benzin	Sonstige
2025	S0	22,7%	9,6%	20,8%	46,7%	0,2%
	S1a	22,1%	6,5%	22,3%	48,9%	0,2%
	S1b	22,1%	6,5%	22,3%	48,9%	0,2%
	S2	22,7%	9,6%	20,8%	46,7%	0,2%
2026	S0	26,9%	9,0%	19,8%	44,1%	0,2%
	S1a	27,1%	5,8%	21,0%	45,9%	0,2%
	S1b	27,1%	5,8%	21,0%	45,9%	0,2%
	S2	26,9%	9,0%	19,8%	44,1%	0,2%
2027	S0	33,3%	9,6%	17,5%	39,4%	0,1%
	S1a	33,8%	5,8%	18,9%	41,3%	0,2%
	S1b	33,8%	6,1%	18,8%	41,2%	0,2%
	S2	33,4%	9,0%	17,8%	39,7%	0,1%
2028	S0	41,2%	9,6%	15,2%	33,9%	0,1%
	S1a	41,7%	5,8%	16,6%	35,8%	0,1%
	S1b	41,6%	6,0%	16,5%	35,7%	0,1%
	S2	41,3%	8,9%	15,5%	34,3%	0,1%
2029	S0	49,0%	9,5%	12,8%	28,5%	0,1%
	S1a	49,5%	6,0%	14,1%	30,3%	0,1%
	S1b	49,5%	6,2%	14,0%	30,2%	0,1%
	S2	49,1%	8,9%	13,1%	28,9%	0,1%
2030	S0	58,9%	10,1%	9,5%	21,4%	0,1%
	S1a	56,9%	8,5%	10,6%	23,8%	0,1%
	S1b	56,9%	8,8%	10,5%	23,7%	0,1%
	S2	56,7%	9,7%	10,3%	23,3%	0,1%
2031	S0	66,7%	9,0%	7,7%	16,5%	0,1%
	S1a	62,2%	8,9%	8,9%	20,0%	0,1%
	S1b	61,8%	8,9%	9,0%	20,2%	0,1%
	S2	64,0%	9,6%	8,2%	18,1%	0,1%
2032	S0	74,5%	8,4%	5,5%	11,5%	0,1%
	S1a	69,0%	9,3%	6,6%	15,1%	0,1%
	S1b	68,7%	9,4%	6,6%	15,2%	0,1%
	S2	71,5%	9,4%	5,9%	13,1%	0,1%
2033	S0	82,2%	7,7%	3,3%	6,7%	0,1%
	S1a	76,4%	9,6%	4,2%	9,8%	0,1%
	S1b	76,0%	9,7%	4,3%	10,1%	0,1%
	S2	79,2%	9,0%	3,7%	8,1%	0,1%
2034	S0	91,5%	1,2%	1,7%	5,5%	0,0%
	S1a	89,6%	2,6%	1,8%	6,0%	0,0%
	S1b	89,5%	2,6%	1,8%	6,0%	0,0%
	S2	91,0%	1,8%	1,7%	5,5%	0,0%

Quelle: Eigene Berechnungen